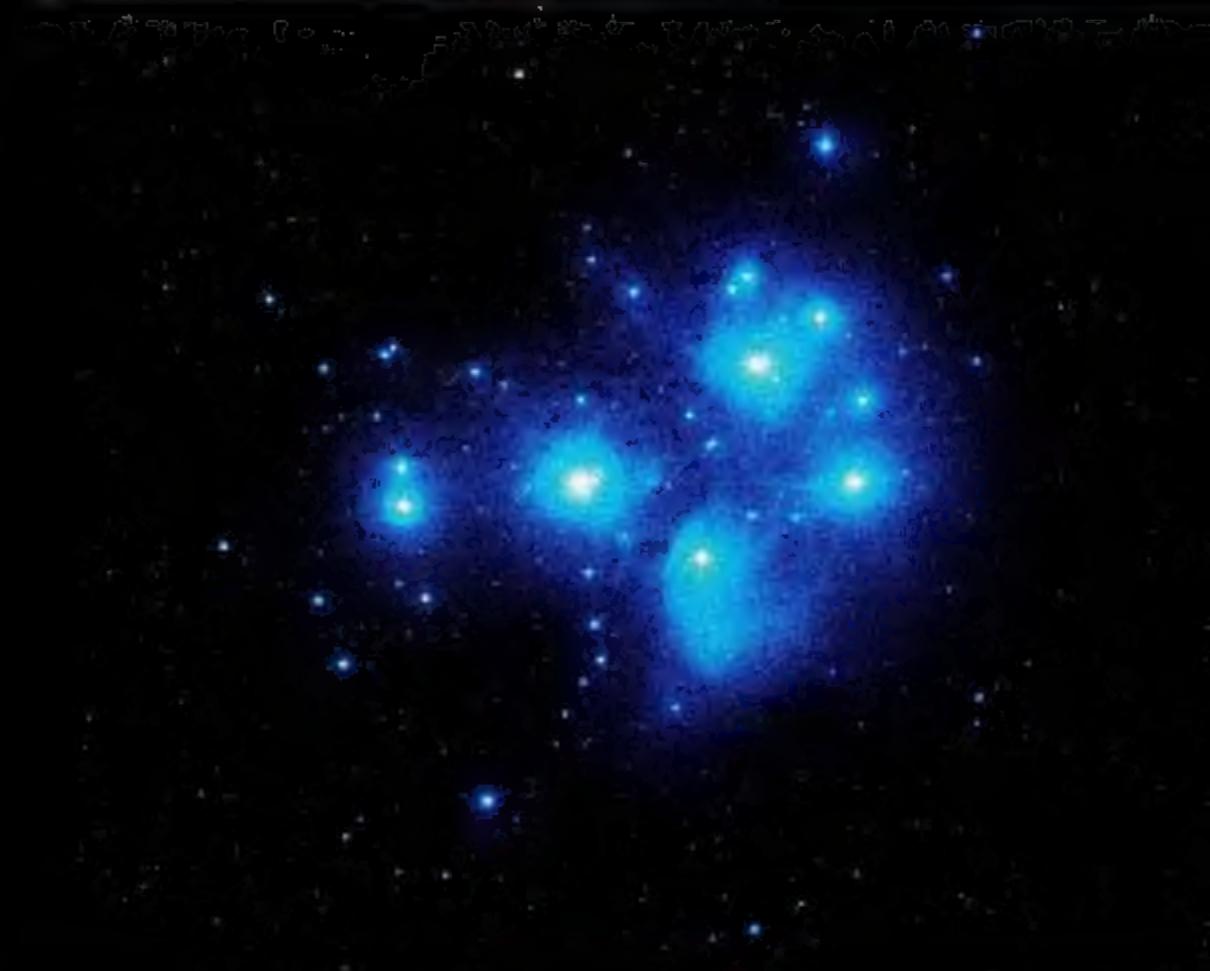


El cielo nocturno

La observación del universo
a lo largo de la historia



Un paseo por el
COSMOS

El cielo nocturno

La observación del universo
a lo largo de la historia

Imagen de cubierta: Las Pléyades, también conocidas como las Siete Hermanas, es el cúmulo estelar mejor visible a simple vista en el cielo nocturno.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Rosa María Ros Ferré por el texto

© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.

© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 131ad, 131ai; Andrew Dunn/CC by-SA 2.0: 140; Biblioteca del Congreso de Estados Unidos: 32b; Camille Flammarion: 91; Davide De Martin & ESA/ESO/NASA: Portada; Diego Rodriguez/CC by-SA 3.0: 27; Fæ/CC by-SA 3.0: 125ad; Francisco Villamena y Jean Leclerc: 113a; Galileo Galilei: 131b; Gerard Edelinck/Charles E. Wagstaff: 115i; Gonzalo Rivero/CC by-SA 3.0: 71a; Hermanos Limbourg: 71b; Joan Pejoan, Reto Stockli/IACETH, MODIS, GSFC, NASA: 86-87; Joan Pejoan/NASA: 43; Linguica: 125ai; Luis García/CC by-SA 3.0: 26; Mike Young: 145a; NASA, ESA, AURA, Caltech: 104; NASA, ESA, G. Bacon/STScI: 19a; NASA: 85a, 85b; NASA/Carla Thomas: 89a; NASA/CXC/NCSU/M. Age Burkey *et al.*/NASA/JPL-Caltech: 55; NASA/JHUAPL/SwRI: 147b; NASA/JPL-Caltech: 59a; NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA: 147a; NASA/JPL: 145b; Reinhard Hauke/CC by-SA 3.0: 35i; Rmashhad: 125b; Takeshi Kuboki/CC by 2.0: 89b; The Starmon/CC by 3.0: 35d; Vysotsky/Wikimedia: 115d; Wellcome Images/Wellcome Trust: 59b; Wikimedia: 18b, 32a, 49a, 49b; Zach Dischner/CC BY 2.0: 113b.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9134-9

Depósito legal: B-22065-2017

Impreso y encuadrado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN 7

CAPÍTULO 1 Catalogando las estrellas del firmamento 13

CAPÍTULO 2 El progreso de la cosmología 39

CAPÍTULO 3 El movimiento del Sol y la arquitectura 61

CAPÍTULO 4 Eclipses y fases lunares 77

CAPÍTULO 5 De la astronomía a los calendarios 99

CAPÍTULO 6 El sistema solar 121

LECTURAS RECOMENDADAS 153

ÍNDICE 155

INTRODUCCIÓN

Desde el comienzo de los tiempos nuestros antepasados comenzaron a fijarse en los puntos brillantes del cielo nocturno. A diferencia de nosotros, que sufrimos la contaminación lumínica provocada por las numerosas fuentes artificiales de luz que en nuestra época brillan tras el ocaso, nuestros ancestros disponían de un firmamento espléndido, no teniendo además muchas ni muy variadas distracciones por la noche. Así pues, todo apunta a que algunos de ellos destinaban una parte de su tiempo a observar el cielo nocturno, lo cual implica que los fundamentos de la astronomía son muy antiguos. Contemplar el cielo nocturno a ojo desnudo, sin telescopios ni otros instrumentos avanzados, puede parecernos hoy en día un recurso insignificante para la astronomía, pero en la Antigüedad bastó para sentar las bases de esta ciencia. Con un trabajo riguroso de observación sistemática, es posible detectar pautas de movimientos y otros cambios en el cielo, que demostraron a nuestros antepasados que lo que sucedía allá arriba no era aleatorio sino que en buena parte respondía a mecanismos con una conducta predecible. Con el desarrollo de unas matemáticas adecuadas, fue posible extraer información adicional de estas pautas. Los movimientos del Sol y de

la Luna, así como las fases de esta, son los cambios astronómicos más evidentes en el cielo. Prestando más atención, también fue posible detectar y estudiar los movimientos periódicos de algunos puntitos de luz inusuales (los planetas más cercanos). A diferencia de estos puntitos, los demás (esencialmente las estrellas) no parecían cambiar de posición entre sí. Esta inmovilidad propició la identificación de cada región del cielo a partir del aspecto que ofrecía cada conjunto de estrellas. Para describir este se buscaron patrones que se pareciesen, aunque solo fuese vagamente, a cosas conocidas, y así surgieron las constelaciones, como un modo práctico de identificar zonas del cielo nocturno. Cada constelación equivale, en este sentido, al dibujo simple que obtendríamos conectando entre sí las estrellas de cada una mediante las líneas adecuadas.

El cielo fue considerado muy a menudo la morada de dioses, tanto de religiones politeístas como monoteístas. Los astros principales, en especial el Sol, se identificaron con divinidades. Con frecuencia, la arquitectura de los templos dedicados a estas creencias tenía en cuenta la posición del Sol en momentos significativos de su recorrido por el cielo, a fin de integrar al astro rey como un elemento arquitectónico adicional del templo o monumento, haciendo por ejemplo que en una fecha trascendental apareciese justo tras una pequeña ventana sagrada iluminando de manera espectacular un altar u otro elemento litúrgico.

Hubo dogmas sobre el cielo y la Tierra, adoptados por algunas religiones, que acabaron entrando en conflicto directo con las observaciones y teorías de astrónomos posteriores. El más importante de todos estos dogmas probablemente es el geocentrismo, la idea de que la Tierra es el centro del universo, con el Sol y todos los demás astros dando vueltas alrededor de ella. En sus inicios, esta creencia era relativamente empírica. Al Sol se le veía salir por el horizonte al amanecer, avanzar por el cielo durante el día, descender por debajo del horizonte en otro punto al crepúsculo y tras unas horas reaparecer por el lado del alba iniciando un nuevo ciclo; por tanto, y teniendo en cuenta que se tendía a infravalorar muchísimo su tamaño, parecía lógico suponer que giraba alrededor de la Tierra. Razonamientos parecidos

se aplicaban a otros astros. Un modelo muy aceptado de este tipo fue el presentado en el siglo IV a.C. por Aristóteles. De este modelo se extraía la conclusión de que todos los movimientos de los astros alrededor de la Tierra trazaban círculos perfectos. Sin embargo, la observación detallada del cielo nocturno revelaba una anomalía difícil de explicar: algunos planetas, entre ellos Marte, seguían trayectorias en las que periódicamente dejaban de moverse hacia la dirección normal para hacerlo durante un tiempo en la contraria y luego avanzar de nuevo hacia delante. Varios siglos después de Aristóteles, Ptolomeo reconcilió el geocentrismo con esta anomalía al confeccionar un intrincado modelo según el cual cada astro discurría por una circunferencia llamada epíciclo que a su vez lo hacía por otra circunferencia, más grande, llamada deferente, situada en torno a la Tierra pero sin que esta fuese su centro exacto.

Otro dogma fuertemente afianzado fue el de la supuesta inviabilidad del cielo. Más allá de los movimientos cílicos predecibles, se daba por hecho que nada cambiaba; las estrellas siempre brillaban igual; además, ninguna desaparecía ni ninguna nueva aparecía. Por eso, la observación de explosiones estelares de novia o supernova, visibles como estrellas nuevas que surgían de repente y que tiempo después desaparecían, era una verdad incómoda que desde algunas esferas de poder se intentaba desmentir o silenciar. Las estrellas permanentes pero cuya luminosidad era variable, los eclipses de Sol, las manchas temporales en este, el paso de cometas cerca de la Tierra y las caídas de meteoritos en ella eran de igual modo hechos que resultaban perturbadores para las sociedades con este dogma religioso.

Paralelamente al uso no científico de la observación del cielo, se trajeron de esta enseñanzas válidas, que encontraron diversas aplicaciones de gran utilidad. Una de las primeras fue la confección de calendarios que permitiesen conocer con suficiente antelación los mejores momentos del año para las tareas agrícolas, una información vital para abastecerse de alimentos. Otros aspectos de la vida cotidiana también se beneficiaban de un calendario. Sin embargo, crear uno lo bastante preciso no fue fácil. Intercalar periódicamente un año bisiesto para compensar

los desfases, tal como se hizo con el calendario juliano impulsado por Julio César (100 a.C.-44 a.C.), fue de ayuda, pero insuficiente. Un resultado más preciso se logró en el siglo xvi con la reforma introducida por el papa Gregorio XIII, mediante la cual se abandonaba el calendario juliano y se adoptaba el gregoriano, el usado hoy en día como único calendario por casi todas las naciones del mundo.

Para avanzar en el conocimiento del cielo nocturno, era imprescindible tener constancia documental de todas las estrellas visibles en el firmamento, con sus posiciones en él y otros datos. Los catálogos de estrellas fueron y siguen siendo una aportación decisiva al avance de la astronomía. Uno de los más destacados de la Antigüedad fue el confeccionado por Hiparco de Nicea en el siglo ii a.C., considerado por muchos el primer catálogo de este tipo con trascendencia real. Hiparco hizo otras valiosas contribuciones a la ciencia, como por ejemplo su desarrollo de la trigonometría plana y esférica, la introducción de los conceptos geográficos de latitud y longitud que seguimos utilizando y la clasificación de las estrellas por su brillo mediante un sistema de magnitudes que, con algunos cambios, todavía se emplea en la actualidad.

Además de los catálogos de estrellas, se crearon instrumentos y técnicas de medición, así como métodos para extraer información importante de estos datos, con anterioridad a la invención del telescopio. El astrolabio fue uno de ellos. El estudio del cielo ayudó mucho a mejorar el conocimiento geográfico de la propia Tierra. Por ejemplo, Eratóstenes (276 a.C.-194 a.C.) logró no solo corroborar que la Tierra era redonda sino también deducir su radio, obteniendo un valor bastante parecido al real. Las técnicas e instrumentos de la astronomía, junto con los conocimientos sobre el cielo, resultaron decisivos para la navegación marítima a larga distancia. Los grandes viajes de exploración del planeta, como la travesía de Europa a América capitaneada por Cristóbal Colón o la primera vuelta al mundo de la expedición dirigida por Fernando de Magallanes y Juan Sebastián Elcano, se beneficiaron de los avances en astronomía.

Los pioneros en la observación del cielo nocturno o en la interpretación científica correcta de lo observado se toparon

a menudo con el rechazo de sus colegas. Aristarco de Samos (ca. 310 a.C.-230 a.C.) dedujo correctamente que el Sol es más grande que la Tierra y que es esta la que gira alrededor de él y no al revés. Sin embargo, su modelo fue rechazado mayoritariamente por sus contemporáneos, que continuaron apoyando al modelo geocéntrico de Aristóteles. Tuvieron que transcurrir cerca de dos milenios antes de que la verdad se impusiera definitivamente. Giordano Bruno, quemado por la Inquisición en 1600, cometió el crimen de avanzarse a su tiempo al hacer afirmaciones sobre el cosmos que son correctas pero que contradecían dogmas religiosos. Entre otras cosas, afirmó que el universo es muchísimo más extenso de lo que se creía en la época, que hay innumerables soles y que estos a su vez pueden tener planetas a su alrededor. En su visión del cosmos, eliminaba la estructura de esferas concéntricas de Aristóteles y Ptolomeo, que mantenía al exiguo universo aprisionado en compartimentos, y en su lugar repartía los cuerpos celestes por todo el espacio y en cantidades inmensas, tal como hoy se sabe que están distribuidos.

Nicolás Copérnico (1473-1543) inició la demolición del geocentrismo. Pero, a fin de evitarse problemas graves, no divulgó de manera amplia sus ideas hasta poco antes de su muerte. Las detalló en su libro *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*). Esta obra acabaría siendo incluida en la lista de libros prohibidos por la Iglesia católica, el *Index librorum prohibitorum*. Otro brillante astrónomo e impulsor del heliocentrismo, Johannes Kepler (1571-1630), descubridor de las leyes matemáticas sobre el movimiento planetario que llevan su nombre, contó asimismo con obras suyas inscritas en el citado *Index librorum prohibitorum*. Esto y la acusación de brujería a su madre le hicieron ser precavido en la medida de sus posibilidades. También acabó optando por ser cauteloso Galileo Galilei, el principal iniciador de la astronomía con telescopio, defensor del heliocentrismo y uno de los pioneros del método científico moderno, cuando cedió a las presiones de la Inquisición y se retractó de diversas afirmaciones que había hecho. A Galileo le quedó, sin embargo, la satisfacción de aportar una de las pruebas más contundentes y definitivas de la falsedad

del modelo geocéntrico y la veracidad del heliocéntrico: gracias al telescopio, pudo observar las fases de Venus y las variaciones del diámetro aparente del planeta, como muchos otros pudieron observarlas después, y todos esos rasgos resultaron encajar con un sistema solar heliocéntrico mientras que eran imposibles en uno geocéntrico. El telescopio permitiría, además, observar la cara visible de la Luna y de todos los planetas conocidos, abriendo el camino hacia el descubrimiento de aquellos otros ignorados que también dan forma al sistema solar.

La observación del cielo nocturno, en definitiva, ofreció finalmente algo de luz al mundo que durante tanto tiempo había estado dominado por el oscurantismo.

Catalogando las estrellas del firmamento

La humanidad siempre ha observado el cielo. Con los primeros astrónomos, la contemplación de las estrellas, la Luna, el Sol y los planetas se convirtió en una actividad sistemática. Aparecieron los catálogos estelares y los instrumentos prácticos para aprovechar este conocimiento.

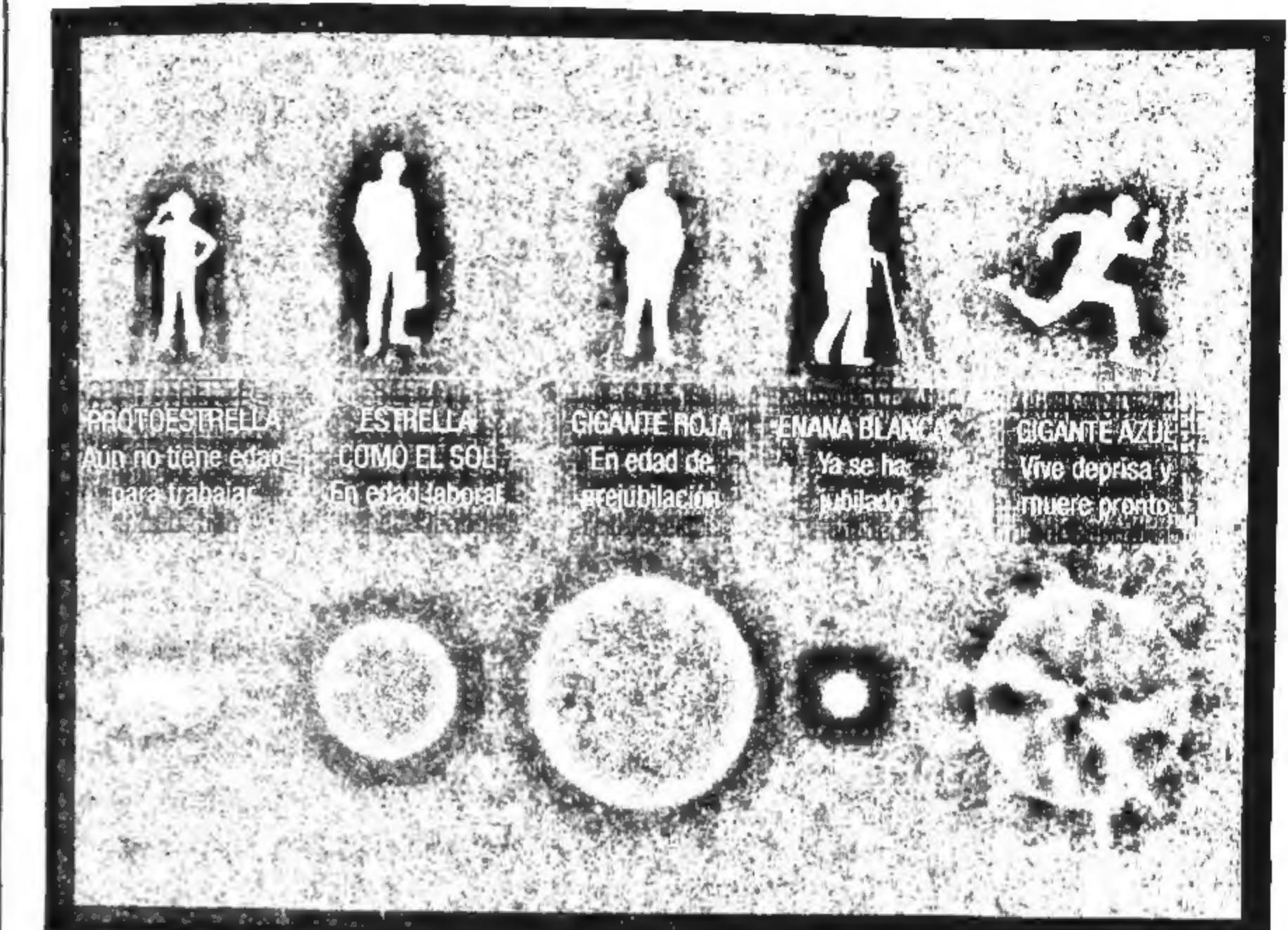
La astronomía ha estado presente en todas las civilizaciones desde sus inicios. En muchas ocasiones, las mitologías y creencias se encontraban estrechamente relacionadas con el Sol, la Luna y otros objetos lo bastante brillantes en el cielo, con unas características propias y de distinción respecto al fondo estrellado. En la mitología del antiguo Egipto, por ejemplo, el Sol era un personaje principal.

El Nilo es lo que convierte en Egipto una tierra desértica en un lugar fértil donde prosperan los cultivos. Sus crecidas, que son fuente de vida, debían por tanto ser previstas y esperadas. Fue entonces cuando los sacerdotes egipcios asociaron sus inundaciones con la aparición de la estrella más brillante de la bóveda celeste en sus latitudes: Sirio. Las estrellas salen y se ponen al igual que el Sol, que en el fondo es solo una estrella más, solo que más próxima a nosotros. Según sea la latitud del lugar, el periodo de invisibilidad de una estrella es más o menos corto, tal como sucede con el Sol, que no resulta visible durante meses en algunas latitudes extremas. Por este mismo motivo, la estrella Sirio resulta invisible durante 70 días, para volver a ser aparente durante unos meses. Al primer instante en que se hace visible se le

Sin ser tan impresionantes como las supernovas, el resto de estrellas también constituye un espectáculo de gran interés. La observación del cielo permite distinguir estrellas de diversos colores. El color se corresponde con la temperatura, que es más alta cuando el color es el azul, decreciendo con el blanco, el amarillo, el naranja y el rojo, por este orden. Las distintas temperaturas denotan estrellas de tipos distintos o bien del mismo tipo pero con edades diferentes. De igual modo que paseando por el barrio podemos ver personas con distintas constituciones físicas y de todas las edades, cuando se observa el cosmos es posible ver una diversidad comparable. En el símil poblacional laboral mostrado en la figura 2, las protoestrellas son soles en formación equivalentes a jóvenes que aún no tienen la edad suficiente para trabajar. El Sol y otras estrellas están en la etapa de vida estelar que se conoce como secuencia principal; podríamos compararlas a personas en edad laboral, aunque en el caso de las estrellas la velocidad de envejecimiento, y por ende el tiempo que permanecen activas como tales, varía muchísimo, hasta varios órdenes de magnitud. Estas y otras estrellas se convierten en gigantes rojas (o alcanzan un estado equivalente) cuando llegan a una fase de madurez comparable a la edad de prejubilación en los humanos. Algunas estrellas cesan su fusión nuclear sin violencia autodestructiva, lo que permite que aún sean capaces de seguir emitiendo luz durante mucho tiempo; son las enanas blancas, que irán apagándose poco a poco y que son como personas que se han jubilado pero a las que aún les quedan bastantes años felices de vida. Otras estrellas, las gigantes azules, de vida hiperactiva pero muy breve, acaban su existencia en una explosión que las aniquila; son como personas que optan por vivir al límite, consumiendo a ritmo frenético sus fuerzas y recursos, ostentando un esplendor tan grande como efímero, y yendo rumbo a un desastre seguro.

Las novas y supernovas no son las únicas estrellas que experimentan cambios de brillo. Otras también lo hacen, aunque no de manera tan violenta. A estos astros se les conoce como *estrellas variables*, debido a que su magnitud aparente varía de forma periódica. Por ejemplo, la variabilidad de Algol fue registrada por

FIG. 2



Símil entre tipos de estrellas y grupos demográficos.

primera vez en la edad moderna por Geminiano Montanari (1633-1687), pero parece que ya era conocida por los egipcios hace más de tres milenios. De hecho, el documento histórico más antiguo en el que aparece el descubrimiento de una estrella variable es el *calendario de El Cairo*. El nombre de Algol procede del árabe (*Ras al-gul*, la cabeza del diablo) y posiblemente fue llamada así porque, en una época en que los cielos se consideraban inmutables, una estrella con cambios periódicos de magnitud (cada 68 horas y 49 minutos) solo podía ser obra del diablo.

En la actualidad, casi todas las estrellas más brillantes tienen nombres árabes, muchas veces derivados de los nombres griegos que figuraban en el *Almagesto* de Ptolomeo. Además,

muchos términos astronómicos tienen origen árabe, como cenit, nadir, almicantarat o azimut, entre otros. En cualquier caso, los astrónomos árabes destacaron por su excelencia en los trabajos matemáticos para los cálculos de efemérides, introduciendo la trigonometría y otros desarrollos, como en el caso de Abú al-Wafá (siglo x).

Y no solo tradujeron el *Almagesto* de Ptolomeo, sino que gracias a sus excelentes observaciones consiguieron introducir un gran número de mejoras. Por ejemplo, Al Sufi (903-986), trabajando en Bagdad, publicó *El libro de las estrellas fijas*, en el que ampliaba el *Almagesto*. En él catalogó 1 018 estrellas, registrando sus posiciones e incluyendo la magnitud y el color de cada astro, así como sus posibles variaciones, corrigiendo a Ptolomeo con arreglo a sus observaciones más precisas de ambos parámetros. También fue el primero en mencionar a la galaxia de Andrómeda (M31), visible a simple vista, pero que nunca se había incluido con anterioridad. Finalmente, hay que mencionar que Al Sufi introdujo en su libro la identificación de cada estrella brillante mediante una letra (en árabe), costumbre que después Johann Bayer imitó en la Europa de los siglos xv y xvi.

De hecho, el *Almagesto* fue traducido del griego al árabe en numerosas ocasiones durante los siglos ix al xv y fue conocido en la Europa medieval precisamente gracias a estas traducciones. Sin embargo, como se ha mencionado, los astrónomos musulmanes se dieron cuenta de que no se trataba de una obra perfecta, sino que era mejorable, y practicaron en él las primeras correcciones. Así, Albategnius (ca. 858-929) llevó a cabo muchas observaciones astronómicas desde Siria, siendo pionero en el uso de métodos trigonométricos. Consiguió catalogar 489 estrellas con bastante precisión, determinó la inclinación de la eclíptica así como cuánto dura un año solar y describió la existencia de eclipses solares anulares. Albategnius se basó en el *Almagesto*, pero fue más allá y mejoró muchas de las observaciones que este incluía.

Por su parte, Azarquiel (1029-1087) fue un astrónomo de Toledo, en al-Ándalus, reconocido por sus importantes obser-

vaciones astronómicas, las cuales recopiló en sus *Tablas toledanas*. Dicha obra sirvió de base para la confección de las llamadas *Tablas alfoncias*, realizadas por Alfonso X el Sabio (1221-1284) y sus colaboradores. Las *Tablas toledanas* fueron traducidas del original árabe al latín, al hebreo y a otros idiomas, lo que facilitó la gran difusión de su trabajo.

Azarquiel fue un especialista en la construcción de *astrolabios*. El astrolabio es un instrumento astronómico que se usaba para determinar la posición de las estrellas sobre el cielo y obtener datos útiles a partir de ello. También inventó la *azafea*, un astrolabio universal, que simplificó el manejo del astrolabio tradicional y permitió incrementar la precisión en el cálculo de la latitud para los navegantes, siendo muy utilizado hasta el siglo xvi.

El más famoso constructor de astrolabios árabes fue Ibn al-Shatir (1304-1375), cuyos diseños consiguieron gran popularidad en toda Europa.

El auge de la astronomía árabe fue posible gracias al contacto con las culturas de los territorios conquistados, como fue la herencia grecolatina del Imperio bizantino, el saber científico persa y la astronomía hindú. También ayudó a aumentar el interés en los temas astronómicos el hecho de que muchos religiosos y líderes musulmanes deseaban precisar las orientaciones de las mezquitas y de otros edificios con relación a La Meca.

Posteriormente, en el siglo xiii, Alfonso X el Sabio, rey de Castilla, mandó recopilar las citadas *Tablas alfoncias*, de forma que gracias a la escuela de traductores de Toledo llegó a Europa el conocimiento de la astronomía árabe. Pero aunque diversos autores usaron estos conocimientos, hay que reconocer que los científicos del Renacimiento contemplaron las obras de origen islámico con suma indiferencia. A pesar de todo, Copérnico, en su famoso libro *De revolutionibus orbium coelestium*, muestra su agradecimiento a Albategnius y a Azarquiel, nombrando sus obras en diversas ocasiones.

La más mínima desviación de la verdad se verá multiplicada más tarde.

ARISTÓTELES

ASTROLABIOS Y PLANISFERIOS CELESTES

La palabra astrolabio significa etimológicamente «el que busca estrellas». Los astrolabios antiguos eran instrumentos planos o esféricos de bronce que representaban el firmamento con sus principales estrellas en la parte llamada araña, y con otros accesorios, como son la alidada, los límbos graduados y unas escalas para medir ángulos y relaciones trigonométricas. Los astrolabios permiten observar el movimiento de los astros, fijar su posición, medir alturas astronómicas y determinar la latitud del lugar.

Los primeros astrolabios

Su origen se atribuye a los babilonios (a partir del año 5000 a.C.). Los egipcios ya los usaban en el siglo II a.C., mientras que Hiparco de Nicea lo haría alrededor del año 150 a.C. Los árabes perfeccionaron el astrolabio consiguiendo instrumentos de gran precisión. Además de ubicar las distintas posiciones de los astros, servía para resolver problemas astronómicos más complejos. Estaba formado por un círculo completo o una sección de círculo, dividido en grados, y constaba de un brazo móvil colocado en el centro. Cuando el punto cero del círculo se orientaba con el horizonte, la altura o azimut de un cuerpo celeste se podía medir observando el brazo. En cada uno de los extremos de la araña se representaba una estrella principal. Los marineros musulmanes lo usaban también a menudo para calcular el horario de oración y localizar la dirección de La Meca. Del siglo XVI al XVIII se empleó como el principal instrumento de navegación por mar, hasta la introducción del sextante a mediados del siglo XVIII.

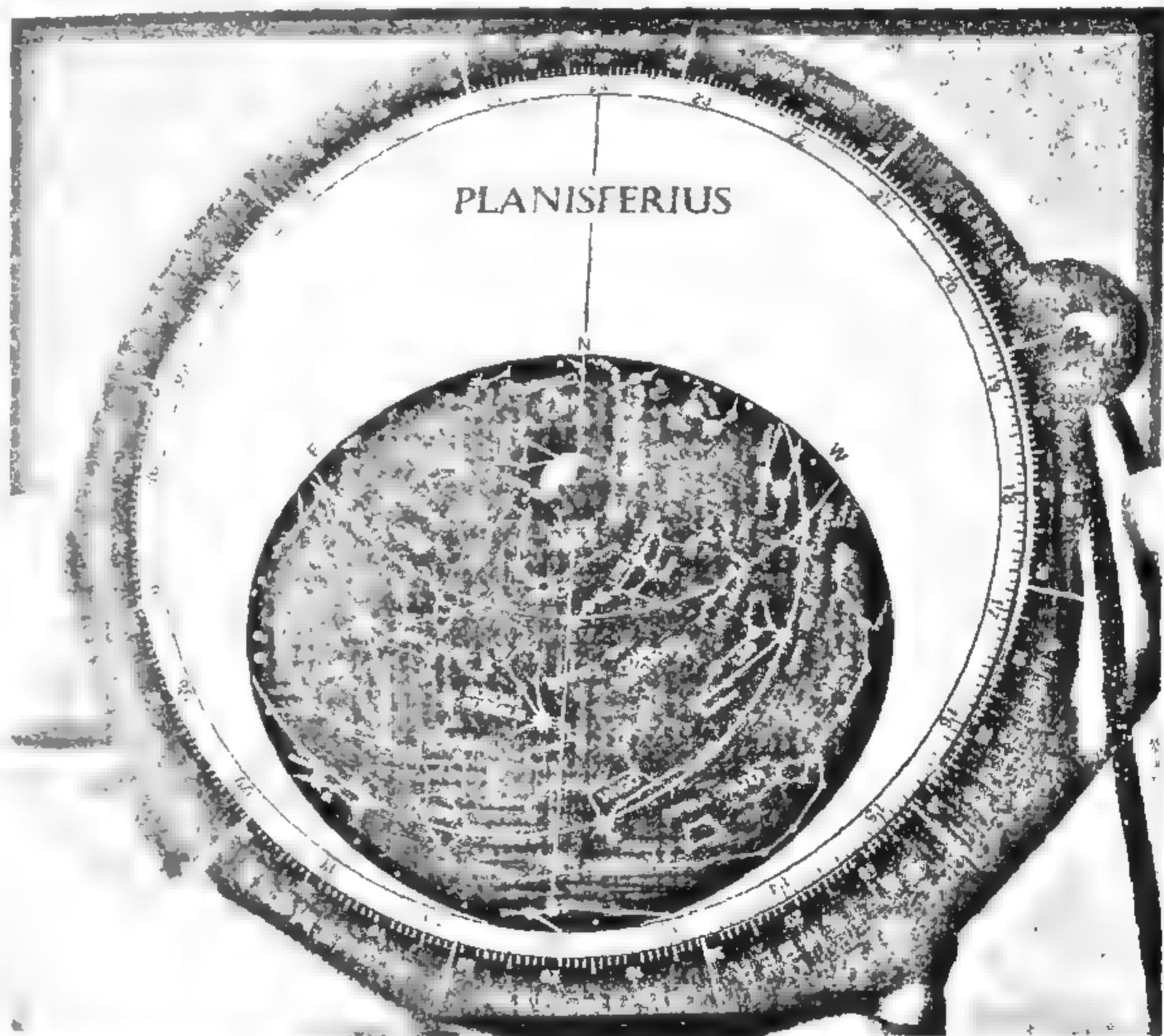
Los planisferios celestes

Actualmente, para buscar estrellas, no usamos los astrolabios sino los planisferios celestes, que en esencia son una simplificación muy elemental de los mapas de estrellas. No permiten hacer cálculos de ningún tipo ni determinar la latitud, pero sí sirven para marcar la posición de las estrellas en un mapa sencillo de usar. El planisferio celeste es una carta estelar formada por dos discos concéntricos que giran sobre un centro común. Permite mostrar las estrellas visibles en un momento dado y poder reconocerlas. El astrolabio es un predecesor del moderno y sencillo planisferio. El planisferio celeste corresponde a la proyección de la esfera celeste sobre una superficie plana y, por lo tanto, da lugar a una importante distorsión. Está compuesto por la carta estelar,



Un astrolabio del siglo X.

unida por su centro a una cubierta opaca circular superpuesta con una ventana elíptica (según sea la latitud del lugar de observación), que delimita la porción del cielo visible en cualquier momento dado. La carta estelar contiene las constelaciones y las estrellas más brillantes. En el borde de la cubierta superpuesta se dibujan las veinticuatro horas del movimiento de rotación terrestre y los doce meses del año correspondientes al movimiento de traslación. El disco base y la cubierta con la ventana están ajustados de forma que el tiempo local del observador en una fecha dada corresponda a la fecha de ese día en la carta estelar. Para usar el planisferio hay que sujetarlo sobre la cabeza, orientando la carta estelar con la ayuda del polo celeste y alguna constelación de referencia. La cubierta se gira hasta que la hora coincida con la fecha en que se desea observar.



Un planisferio celeste.

DETERMINAR LA LATITUD CON UN CUADRANTE

La determinación de la latitud era algo ya conocido desde la Antigüedad, pues, a medida que nos movemos hacia el norte o hacia el sur, cambian las estrellas que se ven y su altura sobre el horizonte. En consecuencia, el primer procedimiento para obtener la latitud consistió en medir la altura de la estrella polar sobre el horizonte.

La latitud de un lugar es el ángulo desde el ecuador hasta ese lugar medido sobre el meridiano terrestre, ϕ . Este ángulo, como se aprecia en la figura 3, se corresponde con el ángulo que va

FIG. 3

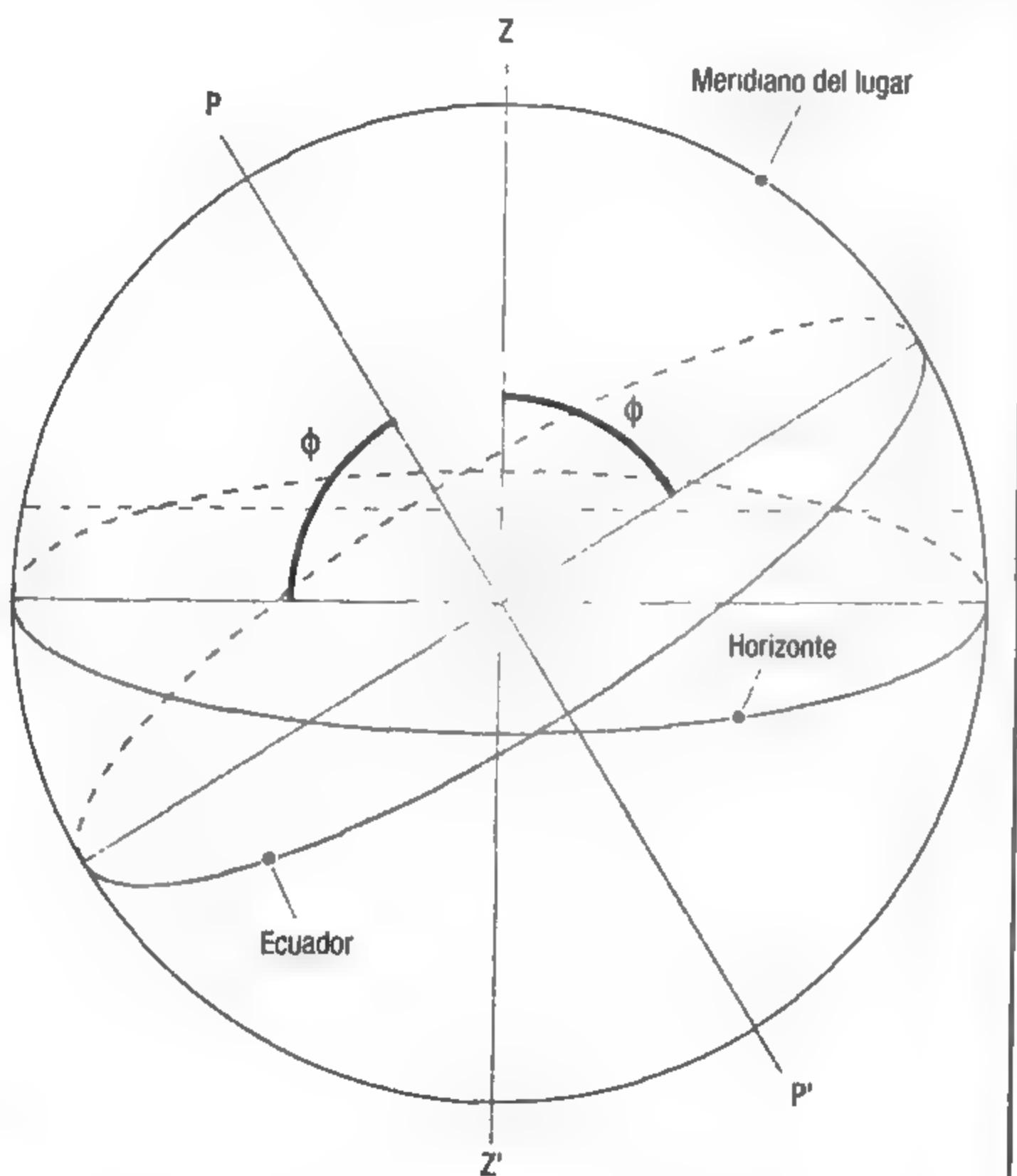
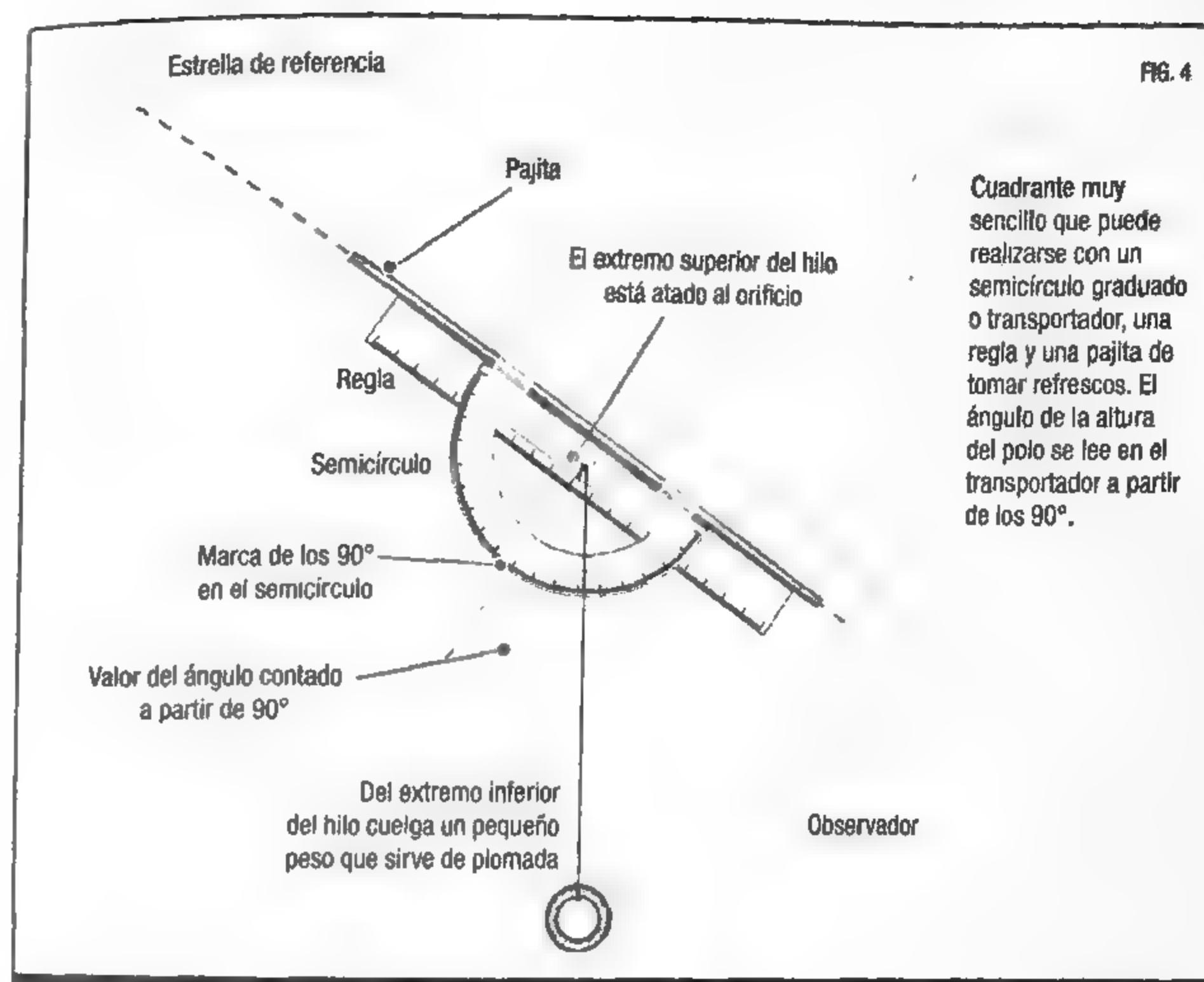


FIG. 4



Cuadrante muy sencillo que puede realizarse con un semicírculo graduado o transportador, una regla y una pajita de tomar refrescos. El ángulo de la altura del polo se lee en el transportador a partir de los 90°.

desde el horizonte hasta el polo, es decir, la altura del polo sobre el horizonte. El motivo son las perpendicularidades: la latitud del lugar es el ángulo entre el plano del ecuador y la plomada ZZ' que pasa por el lugar y el centro de la Tierra; la plomada es perpendicular al horizonte y el eje de rotación terrestre lo es al ecuador; por lo tanto, el ángulo entre estos dos últimos debe coincidir con la latitud del lugar ϕ .

Cabe preguntarse entonces cómo se puede determinar la altura del polo. Se puede hacer con un cuadrante. Para construir uno de forma muy sencilla (figura 4) basta con disponer de un semicírculo graduado de los que tienen un agujero en el origen de ángulos, una regla y una pajita de tomar refrescos. En primer lugar pasaremos un hilo por el agujero del semicírculo o transportador, lo fijaremos con un nudo y en el otro extre-

mo ataremos una piedra pequeña o una llave, o algo un poco pesado para usarlo de plomada. Después fijaremos la pajita a la regla y el semicírculo a esta, de forma que al mirar a través de la pajita podamos ver la estrella Polar (el polo norte si estamos en este hemisferio, o el polo sur con la ayuda de la Cruz del Sur, si estamos en el otro, aunque en este caso es algo más complicado).

El ángulo que señala la plomada sobre el semicírculo (contando a partir de los 90°) coincide con la altura del polo por perpendicularidad.

Para calcular la latitud, además de la estrella polar y la Cruz del Sur, puede usarse cualquier otra estrella en el momento de su paso por el meridiano local, conociendo su distancia al polo. Pero el proceso se complica.

Otra opción para determinar la latitud es usar el Sol, midiendo la altura de este sobre el horizonte al mediodía solar. El hecho de que la altura del Sol varíe, no solo por los cambios de latitud, sino a lo largo del año (en invierno su altura es menor que en verano), hace necesario el uso de tablas, lo que lo hace más engorroso, aunque factible.

NAVEGAR GUIÁNDOSE POR LAS ESTRELLAS PARA LA LATITUD

Ya hemos visto que la latitud de un lugar se puede determinar utilizando un sencillo cuadrante. Un instrumento parecido se usó desde la Antigüedad para que los marinos o viajantes por el desierto pudieran conocerla, de manera que si la mantenían podían desplazarse a lo largo de un paralelo terrestre.

Un ejemplo célebre de viaje de exploración a gran distancia en el cual se utilizó la navegación ayudada por las estrellas fue la primera expedición de Cristóbal Colón a América. Colón siempre creyó en la esfericidad de la Tierra. De hecho, en el siglo xv solo unos pocos pensaban que la Tierra era plana y que uno podía caer si llegaba a sus confines. Lo que no se conocía con precisión era la distancia de Europa a Asia hacia el oeste, por mar. Aunque Eratóstenes ya había calculado el radio de la Tierra,

Colón realizó sus cálculos de forma errónea, y obtuvo un tamaño del planeta una cuarta parte más pequeño.

El producto más deseado de Asia en Europa eran las especias, útiles como condimento o como conservante. Para llegar a las Indias la ruta era muy difícil yendo hacia el este y resultaba muy caro traer tales aderezos. Por ese motivo Colón quería llegar a Asia navegando hacia el oeste. Textos atribuidos a él hacen pensar que su objetivo principal era la isla de Cipango, que era como se conocía a Japón. Cristóbal Colón partió con tres carabelas: la *Niña*, la *Pinta*, y otra mayor, la *Santa María*, la nao capitana. Según el Diario se hicieron a la mar el 3 de agosto de 1492 y las tres naves se dirigieron hacia las islas Canarias, el territorio más al oeste, para poder avituallarse. Allí emprendieron la travesía por el océano Atlántico en dirección oeste. La latitud de la isla de Gomera desde donde partieron es de unos 28° N.

Colón creía que la distancia entre España y Japón sería de entre 3000 y 5 000 km, cuando la distancia real es de unos 19 000 km. Afortunadamente, en medio estaba un continente situado a unos 6500 km, lo que les permitió salvar sus vidas. Una carabela podía recorrer unos 120 km al día y, en óptimas condiciones, podía llegar hasta 160 km, lo que era una velocidad realmente impresionante. Como la latitud de Japón se encuentra entre 30° y 40° N, la idea era seguir el paralelo hacia el oeste.

Se sabe por su diario que Colón, durante la noche, calculaba la latitud a la que se encontraban los barcos con la ayuda de un cuadrante apuntado hacia la estrella polar, siguiendo el mismo paralelo hacia el oeste. No obstante, la posición de la polar no coincide exactamente con la del polo norte celeste, motivo por el que se menciona que Colón vigilaba la posición en la que se encuentra la estrella Kochab (conocida como la *guardia delantera* en la constelación de la Osa Menor) con respecto a la polar en el firmamento. De hecho, se sabe que realizó un estudio de la desviación magnética.

El 1 de octubre ya habían recorrido 5 000 km, después de dos meses navegando. La comida se pudría y el olor era insopportable. El 6 de octubre, uno de los hermanos Pinzón le pidió a Colón

LA PRIMERA VUELTA AL MUNDO

Fernando de Magallanes (1480-1521) tenía la firme convicción de que no existía una franja de tierra de polo a polo y había buscado sin éxito un paso que cruzase el mar del sur. Después de varios viajes, intentó que Portugal le financiara una expedición para dar la vuelta al mundo, y entró en contacto con el astrónomo Rui Faleiro para que le ayudara en este empeño. Realmente no se conoce el método de Faleiro para determinar la longitud, un cálculo mucho más difícil que el de la latitud, pero parece ser que se basaba en la medida de la variación de la brújula, que no apunta al norte geográfico, sino al norte magnético, y en que esta desviación es diferente según la longitud del lugar. De hecho, Halley, muchos años después, estudió la variación magnética y fue capaz de proporcionar mapas que mostraban las isógonas magnéticas o *líneas de Halley*, pero las variaciones que el método proporcionaba eran poco fiables y finalmente resultó superado por otros procedimientos más efectivos y exactos. A diferencia de la latitud, la longitud fue, durante siglos, un auténtico problema para los navegantes y cartógrafos. Llegó a ser tan arduo que diversos países ofrecieron premios y remuneraciones a quien fuera capaz de resolver la obtención de longitudes geográficas.

Salida desde España

En 1517 Magallanes llegó a Sevilla para ponerse al servicio de la Corona española. Finalmente, el 22 de marzo de 1518, firmaba la «Capitulación» con Carlos I, donde se detallaba que la flota tendría dos capitanes generales: Magallanes y Faleiro, el astrónomo que se encargara de construir los instrumentos necesarios para resolver el tema de la longitud. No se sabe por



Juan Sebastián Elcano.

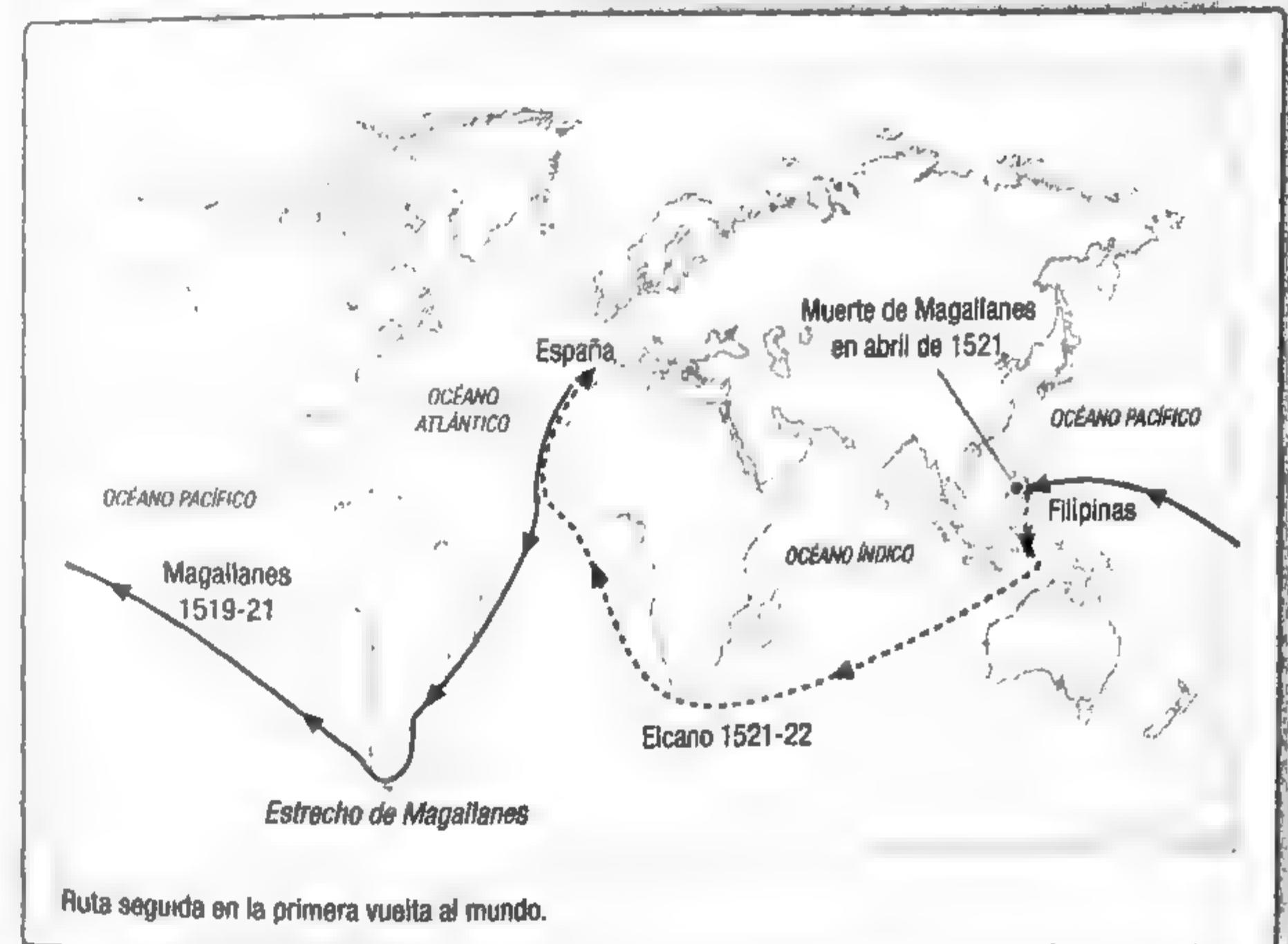


Fernando de Magallanes.

qué motivo Faleiro fue sustituido por Andrés de San Martín, quien siguió las indicaciones del primero para determinar su posición en alta mar, con buenos resultados para la época. Definitivamente, quedó Magallanes como capitán general, con Juan de Cartagena como «adjunto» al mismo, para cuidar de la buena marcha general de la expedición y que no hubiera negligencias en tareas de límites ambiguos e imprecisos. La flota la formaron cinco naves: *Trinidad* (la capitana), *San Antonio*, *Concepción*, *Victoria* y *Santiago*, con una tripulación de 265 hombres. Partiendo de Sevilla, se llegó a Santlúcar de Barrameda, desde donde el 20 de septiembre de 1519 comenzó la travesía marítima con escala en las islas Canarias.

La mayor hazaña

Tras la muerte de Magallanes y la pérdida de cuatro de las naos que partieron, la expedición consiguió su objetivo, al encontrar un paso por el sur de América y una ruta por el océano Pacífico. A su regreso en septiembre de 1522, después de unos tres años de navegación, la nao *Victoria*, con solo 18 hombres al mando de Juan Sebastián Elcano (gran marino y científico), se había convertido en la primera que había logrado circunnavegar el globo. Fue una gesta extraordinaria tras cruzar tres océanos: Atlántico, Pacífico e Índico.



que cambiase el rumbo, yendo más hacia el suroeste, pero este se negó. El 7 de octubre abandonaron el paralelo que iban siguiendo, aunque afectados por las corrientes y la deriva, y tomaron rumbo suroeste. Ya habían visto vegetación en el agua y aves cuando el 11 de octubre Colón dijo haber visto una lucecita. Cuando amaneció el 12 de octubre de 1492, fue Rodrigo de Triana, un marinero de la *Pinta*, el que dio el aviso de tierra. Era una isla del Caribe, de un nuevo continente, que Colón bautizó como San Salvador (Guanahani, 24° N), pero él pensaba que se encontraba en alguna de las islas de las Indias (cuya latitud media es de unos 20° N).

LOS CATALOGOS DE ESTRELLAS EN LA ACTUALIDAD

Hoy en día los astrónomos siguen interesados en la creación de catálogos estelares completos. Además de los aspectos astrométricos, indicando la posición y los movimientos propios de los astros, se catalogan los aspectos astrofísicos de las estrellas para poder llevar a cabo estudios sobre evolución estelar. Gracias a los estudios espectrales de la luz que emiten las estrellas se puede conocer su composición química, que junto con su luminosidad, temperatura superficial y color permiten deducir muchas de sus características físicas, incluyendo en qué etapa de su vida se hallan. Durante el siglo XX, el programa de investigación astrométrica con más éxito fue la misión Hipparcos (bautizada así en honor al astrónomo Hiparco de Nicea) de la Agencia Espacial Europea (ESA), que estuvo en órbita de manera activa entre 1989 y 1993. Entre sus resultados destaca la medición muy precisa de las posiciones de 100 000 estrellas, incluyendo sus distancias. Además, produjo un segundo catálogo, denominado Tycho, en honor al astrónomo Tycho Brahe, con medidas menos precisas, para otro millón de estrellas.

Los datos obtenidos por la misión Hipparcos han sido fundamentales para conocer mejor la evolución estelar. Han permitido la utilización de los datos astrométricos obtenidos para

EL CINTURÓN DE ORIÓN

En el ábside de la iglesia de Santa María de Taüll situada en el valle de Boí, en el Pirineo catalán, se representa a la Virgen en su trono adornado con una mandorla roja con el niño Jesús bendiciendo con la mano derecha en una escena que corresponde a la adoración de los Reyes Magos. A cada lado de la mandorla hay una estrella de ocho puntas. La de la derecha es de color blanco azulado y la de la izquierda de color rojizo. En la zona del Pirineo catalán, a las tres estrellas del cinturón de Orión se las suele nombrar como los tres reyes porque aparecen juntas en invierno y particularmente en el periodo navideño. Si observamos las estrellas de Orión, por encima de los tres reyes están las estrellas Betelgeuse (que es de color rojizo) y Bellatrix (cuya tonalidad es blanca azulada). Podemos pensar pues que este fresco del ábside de la iglesia refleja una observación astrofísica realizada por el pintor. No se conoce cuándo fue pintado el fresco, pero sí hay constancia de que la consagración de la iglesia tuvo lugar el 11 de diciembre de 1123, lo que nos permite dar una cronología aproximada de las pinturas del altar mayor. Betelgeuse posee su característico color rojizo debido a las bajas temperaturas superficiales, de tan solo unos 3000 kelvins (K). Esta estrella está en un estado evolutivo muy avanzado. Ya terminó el periodo correspondiente a su secuencia principal, habiendo agotado el combustible en su núcleo. Despues de ello, se convirtió en una supergigante roja y en consecuencia tiene unas variaciones de luminosidad propias de su estado evolutivo. Bellatrix es una supergigante azul muy caliente, con 21 500 K de temperatura superficial, que está al principio de su evolución.



Izquierda, detalle de las estrellas en la pintura. La estrella de la izquierda es rojiza como Betelgeuse y la de la derecha es blanca como Bellatrix. Derecha, constelación de Orión con las tres estrellas del cinturón (los tres reyes) en fila, Bellatrix (la más brillante por encima y a la derecha de estas) y Betelgeuse (la más luminosa por encima de Bellatrix y a la izquierda de esta).

determinar las órbitas de distintas estrellas binarias visuales, posibilitando estimar las masas de sus componentes con gran exactitud. El cálculo de las distancias ha permitido conocer con más precisión las magnitudes absolutas de las estrellas del entorno solar.

Siguiendo la estela del éxito de la misión Hipparcos, en 2013 se lanzó el satélite astronómico Gaia de la ESA. Gaia obtendrá un catálogo de aproximadamente mil millones de estrellas hasta la magnitud 20. Registrará las posiciones, distancias y movimiento propio de las estrellas, obtendrá observaciones del color y medidas de la velocidad radial. Gaia creará así un mapa tridimensional de las estrellas de nuestra galaxia, la Vía Láctea, de forma extremadamente precisa. Obtendrá para cada estrella su luminosidad, temperatura y composición química. Estos datos permitirán un estudio sobre el origen, la estructura y la evolución de nuestra galaxia. Se podrá medir asimismo un gran número de datos relativos a quásares, galaxias, exoplanetas y cuerpos del sistema solar.

El 14 de septiembre de 2016 se publicó el primer catálogo con más de mil millones de estrellas analizadas por el satélite Gaia. Se trata de la mayor muestra de objetos celestes hasta la fecha. Con el objetivo de elaborar el mapa tridimensional más detallado de la Vía Láctea, Gaia determinó el brillo y la posición exacta en el firmamento de 1 142 millones de estrellas. Combinando la información reunida por Gaia con la obtenida en la misión Hipparcos, se determinaron también las distancias y los movimientos de 2057050 estrellas.

La información de Gaia incluirá datos detallados de cómo se han desplazado las estrellas en la galaxia debido al tirón que ejerce la propia Vía Láctea sobre ellas. Con ello se podrá comprender mucho mejor la estructura, la dinámica y la naturaleza de las galaxias. Incluso es posible que se pueda reconstruir la historia evolutiva de nuestra Vía Láctea a partir de estos datos.

La misión ayudará a contestar algunas de las cuestiones más complejas sobre la naturaleza del cosmos, como la de la *materia oscura*. De esta se desconoce cómo se distribuye, qué efecto tiene y cómo se mueve. A pesar de ello se cree que juega un papel

fundamental en el universo, aportando masa y condicionando el movimiento global de las galaxias.

Por último, se espera que Gaia sea capaz de descubrir miles de nuevos asteroides en nuestro sistema solar. Si alguno de ellos despertara algún tipo de alarma, se podrá comprobar qué tipo de amenaza es y actuar en consecuencia.

El progreso de la cosmología

A pesar de la oposición religiosa, el esfuerzo de genios como Copérnico, Kepler o Galileo transformó completamente nuestra concepción del universo y del sistema solar en particular. Este cambio de paradigma sería fundamental para avanzar hacia nuestra madurez como especie, interesada por saber dónde está y qué es lo que la rodea.

Todos los pueblos han deseado conocer el origen de la Tierra y qué hay más allá de ella. Pero el concepto de *cosmología* varía con el nivel de conocimiento científico, y debido a ello, las explicaciones más primitivas no tenían nada de ciencia. Por ejemplo, una de las más antiguas de origen hindú presentaba el universo como una estructura finita y cerrada, contenida en el anillo conformado por Seshu, una colossal serpiente, la cual rodeaba completamente un mar de leche. En este océano nadaba una enorme tortuga sobre cuyo caparazón se mantenían cuatro elefantes, cada uno en un punto cardinal. A lomos de estos elefantes estaba la Tierra, en cuyo centro se alzaba una gran montaña alrededor de la cual giraba un vasto fuego dando lugar al día y la noche. Seshu también rodeaba con su anillo a la bóveda celeste. En el siglo vii a.C. surgieron los filósofos jónicos, como Tales de Mileto, que intentaron dar una explicación racional del mundo con la ayuda de las leyes naturales. En el siglo vi a.C. la escuela pitagórica daba una primera explicación del movimiento de los cuerpos celestes, llamada *Armonía de las Esferas*. La Tierra constituía una esfera situada en el centro del mundo. En torno a ella había una serie de esferas

adicionales, y en cada una se hallaban, en este orden: la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter, Saturno y, finalmente, las estrellas fijas. Las esferas estaban en rotación y los cuerpos celestes se desplazaban arrastrados por las suyas respectivas. Sin embargo, este modelo no podía explicar el movimiento *retrogrado* de los planetas.

En la antigua Grecia, los astrónomos de la época veían al Sol, la Luna y las estrellas dar vueltas alrededor de la Tierra, que para muchos debía encontrarse en el centro de todo. El propio Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.) reforzaba esta hipótesis. La Tierra era el centro del universo, y los planetas, el Sol, la Luna y las estrellas se encontraban en esferas fijas que giraban en torno a nuestro mundo. Pero había algunos planetas como Marte que describían trayectorias errantes en el cielo (figura 1), moviéndose hacia delante y hacia atrás, lo cual parecía contradecir el concepto aristotélico del cielo en el que todos los movimientos se manifestaban como círculos perfectos. Esta teoría geocéntrica de Aristóteles fue desarrollada con más detalle años después por Ptolomeo (ca. 100-ca. 170 d.C.). La solución que encontró este fue la supuesta existencia de unas trayectorias que usaban círculos que giraban en torno a puntos donde no había ningún objeto (*epiciclos* y *deferentes*).

Otros dos filósofos griegos propusieron modelos mucho más próximos a la realidad y mucho más correctos. En la época de Aristóteles, Heráclides planteó que la Tierra no estaba inmóvil, sino que giraba sobre sí misma y de esta forma el movimiento aparente de la bóveda celeste a lo largo de 24 horas se explicaba de manera natural, pero la explicación no fue aceptada. Heráclides también planteó que Mercurio y Venus giraban alrededor del Sol en lugar de la Tierra, aunque la propuesta de Aristóteles fue la que tuvo continuidad durante siglos.

Desde nuestro punto de vista, el modelo más interesante es el del astrónomo y matemático Aristarco de Samos (ca. 310 a.C.-230 a.C.). Usando razonamientos geométricos y observaciones, determinó distancias y tamaños relativos entre el Sol, la Tierra y la Luna. Aristarco rechazó el modelo de Aristóteles, pues al deducir que el Sol era mucho más grande que la Tierra concibió que

FIG. 1



En el firmamento, en este caso el visible desde Pasadena en California, la trayectoria de Marte (que empieza en el borde derecho de la imagen y acaba en el izquierdo) parece llevarle a dar marcha atrás y luego otra vez marcha adelante. Se indican las constelaciones como referencia.

el objeto enorme no podía girar alrededor del cuerpo más pequeño. Propuso entonces un nuevo modelo, en el cual el Sol era el verdadero centro y donde todos los planetas, excepto la Luna, gravitaban alrededor de él. Este sistema, desgraciadamente, no fue admitido en la época. Aristarco fue la primera persona, que se sepa, en proponer el modelo *heliocéntrico* del sistema solar, situando al Sol y no la Tierra en el centro del universo conocido en ese momento.

La mayoría de los trabajos originales de Aristarco se perdieron, probablemente en alguno de los diversos incendios que sufrió la Biblioteca de Alejandría. Solo conocemos el modelo heliocéntrico de Aristarco por las citas de otros autores. En particular, Arquímedes escribió: «Tú, rey Gelón, estás enterado de que el universo es el nombre dado por la mayoría de los astrónomos a la esfera cuyo centro es el centro de la Tierra, mientras que su radio es igual a la línea recta que une el centro del Sol y el centro de la Tierra. Esta es la descripción común como la has oído de astrónomos. Pero Aristarco ha sacado un libro que consiste en ciertas hipótesis, en donde se afirma, como consecuencia de las suposiciones hechas, que el universo es muchas veces mayor que el universo recién mencionado. Sus hipótesis son que las estrellas fijas y el Sol permanecen inmóviles, que la Tierra gira alrededor del Sol en la circunferencia de un círculo, que el Sol yace en el centro de la órbita, y que la esfera de las estrellas fijas, situada con casi igual centro que el Sol, es tan grande que el círculo en el cual él supone que la Tierra gira guarda tal proporción a la distancia de las estrellas fijas cuanto el centro de la esfera guarda a su superficie».

Aristarco creía pues que las estrellas estaban enormemente lejos y, en consecuencia, no se podía apreciar un movimiento relativo de unas con respecto a otras durante el movimiento de la Tierra alrededor del Sol (el concepto llamado *paralaje*). Efectivamente, las estrellas están muy lejanas y la paralaje solo se pudo detectar con el uso de buenos telescopios. Pero el modelo geocéntrico carecía de paralaje y además era mayoritariamente aceptado. De hecho la paralaje estelar anual no se pudo detectar hasta 1838, con los estudios de Friedrich Bessel.

Es posible que Aristarco tuviera seguidores y discípulos que desconocemos. Únicamente nos consta el astrónomo Seleuco de Seleucia, nacido en 190 a.C., uno de los más influyentes en Babilonia, que apoyaba el modelo heliocéntrico defendido por Aristarco de Samos. De hecho, Aristarco llegó a teorizar que el universo debía ser mucho mayor de lo que suponían los defensores del geocentrismo, y creía que la Tierra giraba en una órbita circular alrededor del Sol. Gracias a los escritos de Plutarco, hemos podido saber que Seleuco llegó a demostrar el sistema heliocéntrico por medio del razonamiento, aunque no se sabe qué argumentos usó para conseguirlo. Según el historiador griego Estrabón, Seleuco fue el primero en afirmar que las mareas (difíciles de justificar en un modelo geocéntrico) eran debidas a la atracción de la Luna, y que la altura de estas dependía de la posición de nuestro satélite respecto al Sol. Es una pena que la humanidad necesitara unos mil setecientos años, hasta llegar a Nicolás Copérnico, para comenzar a discutir de nuevo la posibilidad de un modelo heliocéntrico como una explicación convincente. Es inevitable preguntarse hasta dónde hubiera podido llegar el conocimiento de nuestro mundo si el modelo de Aristarco de Samos o el de Seleuco de Seleucia hubieran sido considerados en lugar del sistema de Aristóteles y Ptolomeo.

Aristóteles, en su obra *De caelo*, razonaba por qué la Tierra era esférica y daba un valor para su circunferencia con un error de factor dos. Mencionaba que, en los eclipses, el borde de la sombra de la Tierra sobre la superficie lunar siempre era circular. Asimismo, citaba que los viajeros que se dirigían al sur veían las constelaciones subir respecto al horizonte, y que por lo tanto la Tierra no podía ser plana. Posteriormente, también Ptolomeo dio varios razonamientos sobre la forma esférica de la Tierra. Por ejemplo, la observación de que cuando se navegaba hacia una montaña, esta parecía crecer sobre el mar, lo que indicaba que anteriormente estaba oculta por la superficie curvada de este último. Ptolomeo introdujo en sus mapas un globo curvado y usó los conceptos de latitud y longitud.

Para disponer de cálculos más concretos, hubo que esperar hasta Eratóstenes, quien consiguió una estimación de la longitud

EL UNIVERSO SEGÚN ARISTÓTELES Y PTOLEMO

La visión del mundo de Aristóteles y Ptolomeo fue considerada como buena durante toda la Edad Media y llegó hasta la revolución científica de Copérnico. En el siglo iv a.C., el filósofo Aristóteles, apoyándose en las teorías de Platón, presentaba su concepto del universo, en el cual los movimientos de los cuerpos celestes debían ser circulares y a velocidad constante (figura 1). Aristóteles intentaba mejorar el modelo anterior con la Tierra inmóvil en el centro y rodeada de suficientes esferas de cristal que permitieran explicar más o menos los movimientos aparentes de los planetas (que a veces avanzaban y a veces retrogradaban). Combinando 55 esferas, Aristóteles logró reproducir los movimientos de los planetas, pero su sistema no podía explicar las variaciones de luminosidad. Estas variaciones son debidas al cambio de distancia entre la Tierra y cada planeta, mientras que en el sistema aristotélico estaban a una distancia fija. Aristóteles introdujo también otro concepto filosófico que se mantuvo hasta el siglo xv: el interior de la órbita lunar, incluida la Tierra y su atmósfera, era la zona de la imperfección y del cambio, y más allá de la Luna estaba la zona de la perfección y de la inmutabilidad.

La visión ptolemaica

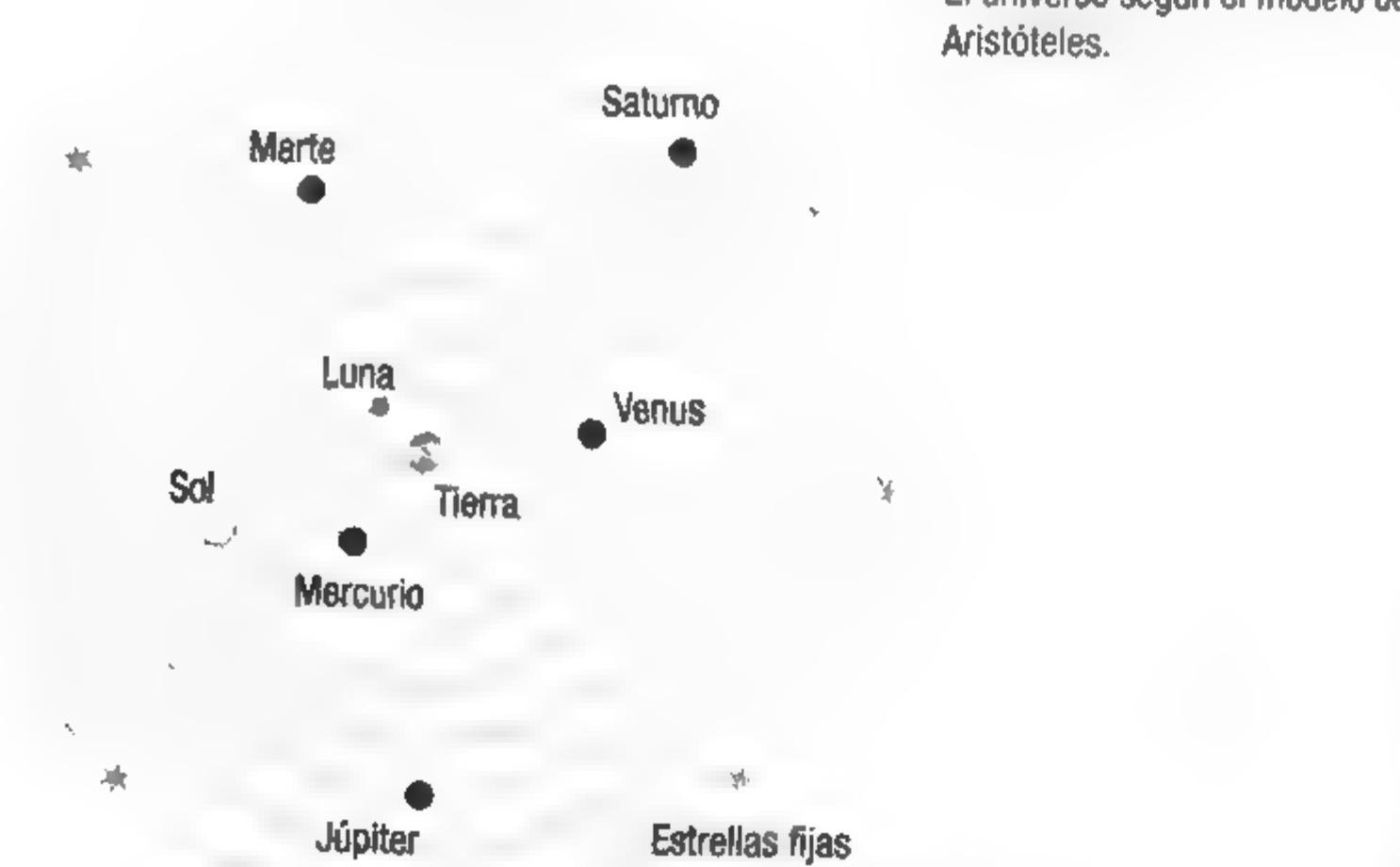
En el siglo ii d.C., Ptolomeo modificó el modelo heredado de Platón y Aristóteles para intentar explicar las variaciones de luminosidad. Para él los planetas se desplazaban por una circunferencia llamada epíclo, cuyo centro se trasladaba por otra mayor alrededor de la Tierra llama-

da deferente (figura 2). Ajustando los tamaños y posiciones de todos los círculos, el sistema conseguía explicar con precisión los movimientos aparentes de los planetas y estaba en condiciones de hacer lo mismo con las variaciones de resplandor, ya que las distancias a la Tierra variaban. Ahora bien, es sorprendente que el modelo se basase en un círculo cuyo centro está sobre otro con ningún objeto en su interior. De todas formas, mejoró el modelo de Aristóteles y su espíritu fue aceptado hasta el siglo xvi. Tanto Aristóteles como Ptolomeo introdujeron conceptos y modelos incorrectos, pero es necesario tenerlos en cuenta por su importancia histórica y también para comprender mejor el gran salto que representó tiempo después la corriente heliocentrista liderada por Nicolás Copérnico y otros.

Los planetas errantes

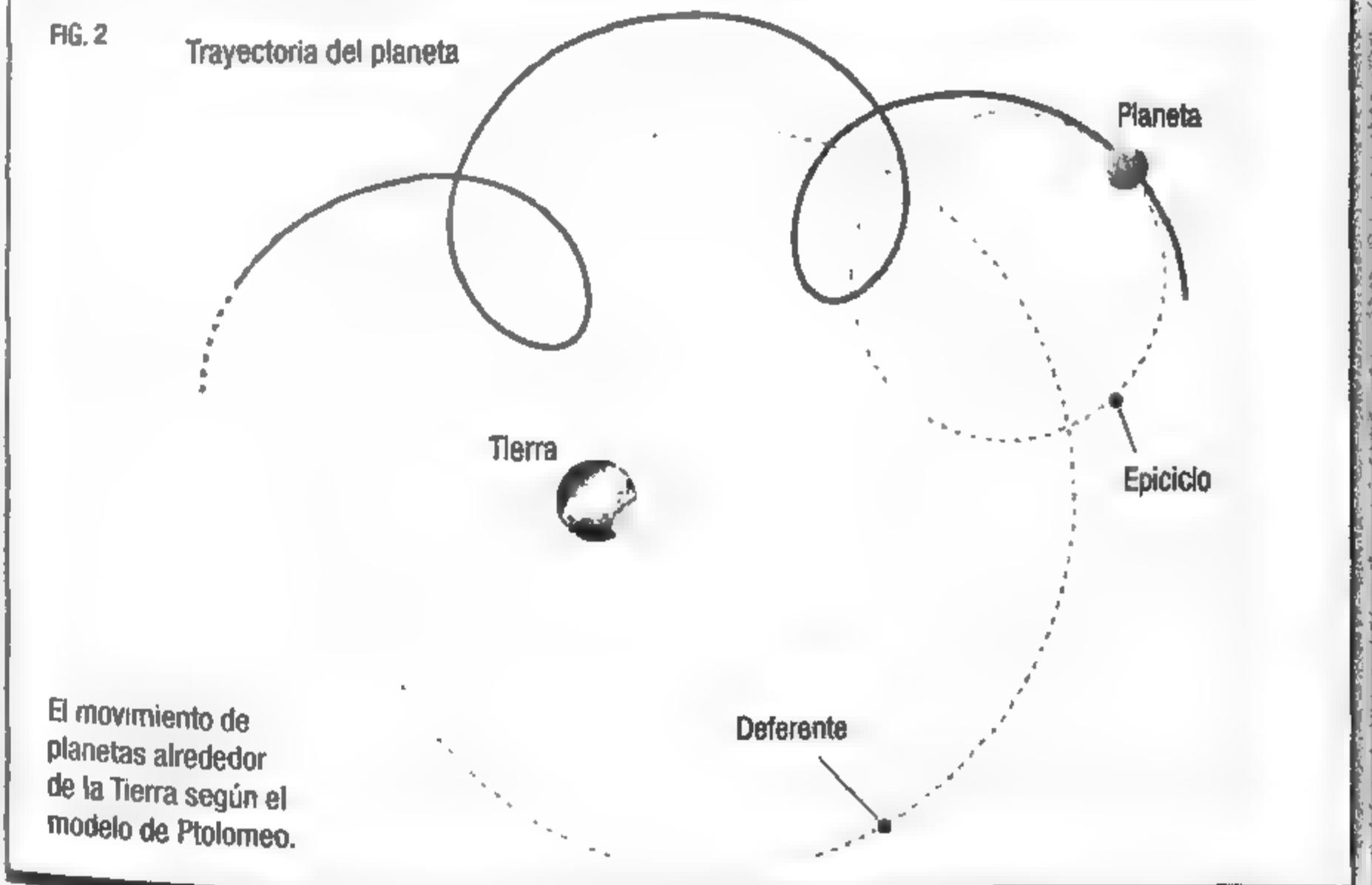
La palabra «planeta» es de origen griego y significa «errante» o «vagabundo». Para ellos eran planetas el Sol y la Luna, que se mueven de una forma más o menos regular, y después los cinco que viajaban de forma más irregular: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Los griegos habían observado que todas las estrellas tenían un movimiento de este a oeste, pero que había algunos astros en la zona zodiacal (8° por encima y por debajo de la eclíptica) que a veces detenían ese movimiento y procedían a moverse de oeste a este (movimiento retrógrado), para después reducir su velocidad y volver al movimiento normal de este a oeste.

FIG. 1



El universo según el modelo de Aristóteles.

FIG. 2



El movimiento de planetas alrededor de la Tierra según el modelo de Ptolomeo.

de la circunferencia terrestre tras extraer la distancia de Siena a Alejandría de 5 000 estadios, lo que le permitió calcular la longitud de la circunferencia de la Tierra en unos 252 000 estadios, cuya equivalencia en kilómetros es bastante similar al valor real hoy medible con toda certeza.

Podemos mencionar también al filósofo romano Lucrecio, del siglo I a.C., que en su obra *De rerum natura* presentaba una concepción del universo muy cercana a la moderna, en algunos sentidos, mientras que en otros resultaba muy retrógrada. Según Lucrecio, la materia estaría constituida por átomos imperecederos en continuo movimiento, que se unirían y se separarían constantemente, formando y deshaciendo cuerpos celestes. El nuestro sería solo uno más entre un número infinito de mundos coexistentes. Aunque Lucrecio no podía aceptar que la Tierra fuera redonda (era una Tierra plana contenida en una esfera celeste), su visión cósmica no dejaba de ser curiosamente profética.

Una vez destruida la Biblioteca de Alejandría, el saber escapó hacia Bizancio y la ciencia se desarrolló en el ámbito del islam. Durante la Edad Media en Europa se mantuvieron las teorías de Aristóteles y Ptolomeo y hubo que esperar al periodo de Copérnico para que surgiera un nuevo concepto del universo.

LA REVOLUCIÓN COPERNICANA

Nicolás Copérnico, además de formular una teoría heliocéntrica coherente, dio inicio a un renacimiento europeo que llevó, a través de Galileo y más tarde Newton, a un cambio de convicciones filosóficas y religiosas.

Copérnico estudió teología, fue canónigo y ejerció cargos administrativos dentro de la Iglesia de Polonia, pero hacia 1507 elaboró una primera visión de su sistema heliocéntrico. Una serie limitada de copias manuscritas de esta obra circuló entre los astrónomos de su tiempo; sin embargo, sus investigaciones se basaron principalmente en el estudio de los textos y de los datos establecidos por sus predecesores, ya que solo se tiene constancia de que realizara medio centenar de observaciones. Copérnico



Arriba, Nicolás Copérnico, astrónomo polaco del Renacimiento que formuló la teoría heliocéntrica del sistema solar. Abajo, Johannes Kepler, astrónomo y matemático alemán, creador de las leyes sobre el movimiento de los planetas en su órbita alrededor del Sol.

EL EXPERIMENTO DE ERATÓSTENES

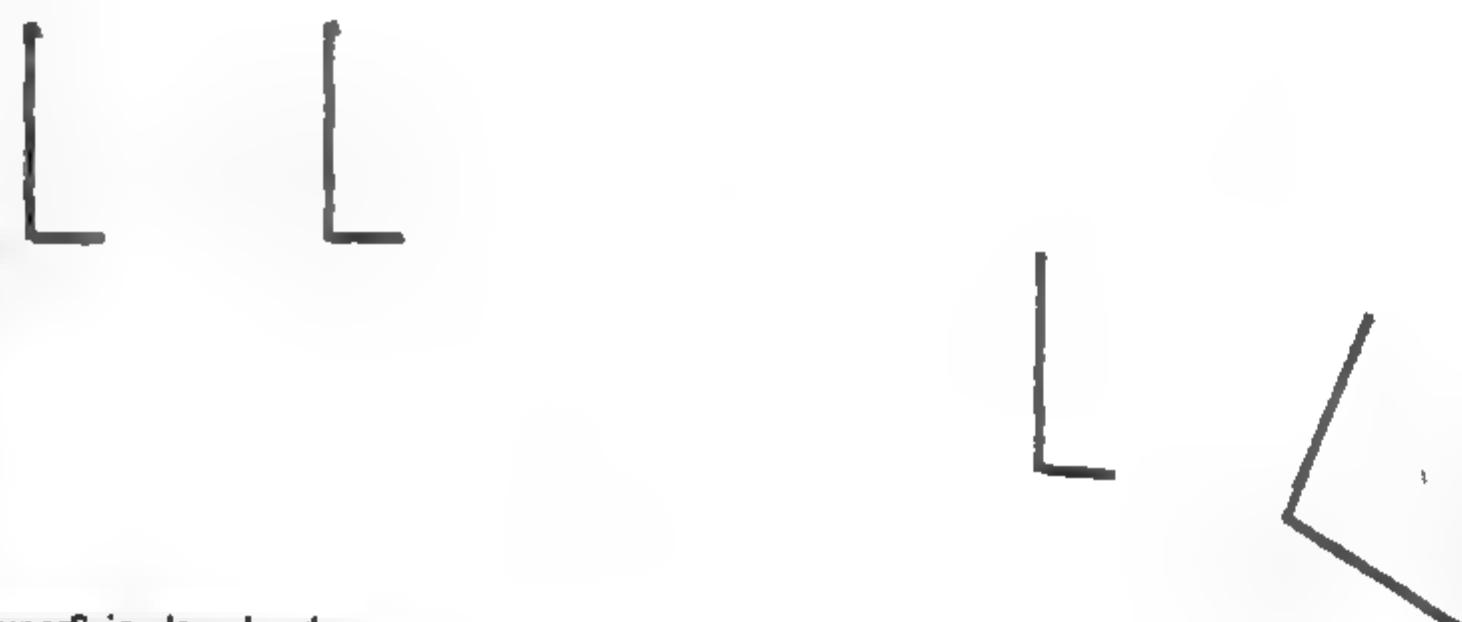
Eratóstenes era el director de la Biblioteca de Alejandría, y en uno de los textos de la misma leyó que en la ciudad de Siena (actualmente Asuan), en el mediodía solar del día del solsticio de verano, el Sol se veía reflejado en el fondo de un pozo. Si en vez de un pozo, allí hubiera una estaca clavada en vertical, no produciría sombra. Observó que ese mismo día a la misma hora una estaca clavada en vertical sí producía sombra en Alejandría, y de ello dedujo que la superficie de la Tierra no podía ser plana, sino más bien la de una gran esfera (figura 1).

La metodología

Si queremos reproducir el experimento de Eratóstenes, consideraremos dos estacas clavadas perpendicularmente en el suelo (apuntando hacia el centro de la Tierra), en dos ciudades de la superficie terrestre situadas sobre el mismo meridiano (figura 2). Suponemos que los rayos solares son paralelos pues el Sol está muy lejos de la Tierra. Los rayos producen dos sombras, una para cada estaca. Es suficiente medir en el mismo instante la longitud de la sombra de cada estaca y dividirla por la longitud de cada estaca para obtener el ángulo que forman los rayos del Sol con cada estaca (ángulos α y β respectivamente en la figura 2) usando la definición de tangente. El ángulo central γ puede calcularse imponiendo que la suma de los ángulos del triángulo de vértice el centro de la Tierra es igual a π radianes. Entonces $\pi = \pi - \alpha + \beta + \gamma$ y simplificando

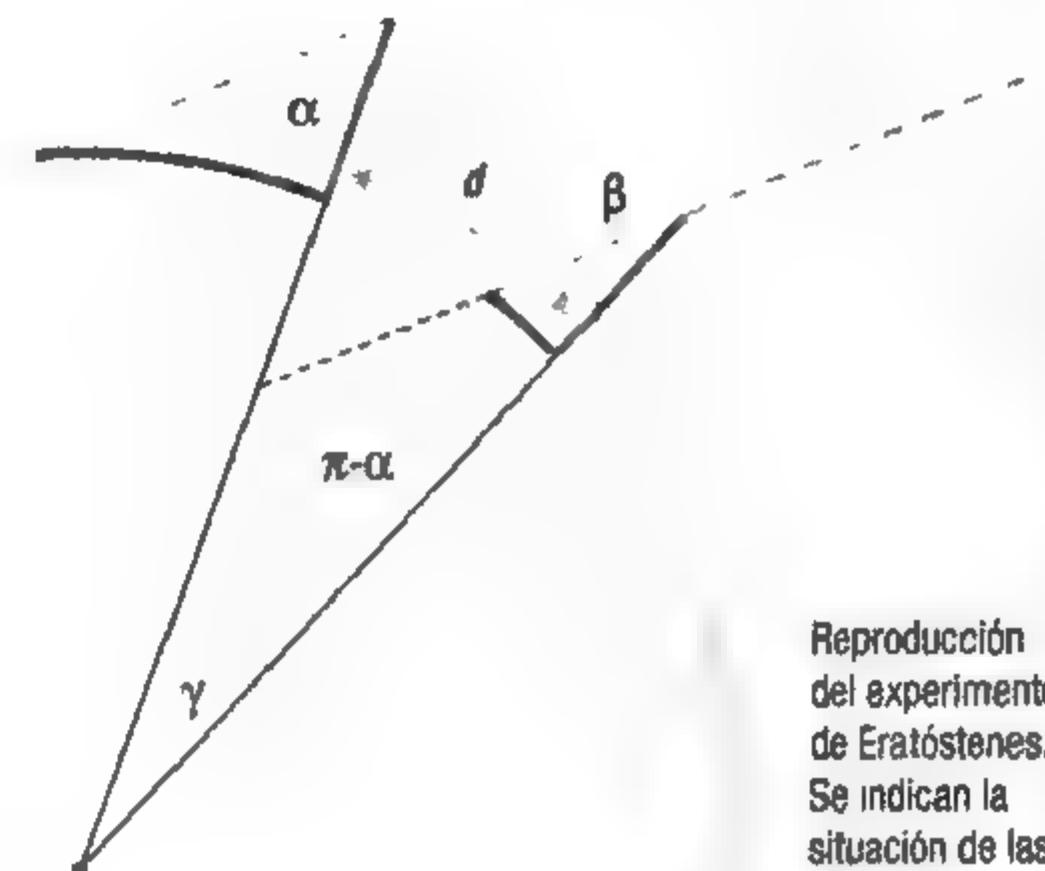
$$\gamma = \alpha - \beta.$$

FIG. 1



En una superficie plana las dos estacas producen la misma sombra (izquierda), pero si la superficie es curvada las sombras son distintas (derecha).

FIG. 2



Reproducción del experimento de Eratóstenes. Se indican la situación de las estacas, sus sombras, los rayos de sol y los ángulos.

donde α y β se han obtenido a partir de medir la estaca y su sombra. Finalmente, estableciendo una proporcionalidad entre el ángulo γ , la longitud de su arco d (determinado por la distancia sobre el meridiano entre las dos ciudades), y 2π radianes del círculo meridiano y su longitud $2\pi R_T$, es decir,

$$\frac{2\pi R_T}{2\pi} = \frac{d}{\gamma}$$

se deduce que:

$$R_T = \frac{d}{\gamma}$$

donde R_T es el radio de la Tierra, γ se ha obtenido a partir de la observación, en radianes, y d es la distancia en kilómetros entre ambas ciudades. Se puede hallar d a partir de un buen mapa. Si no se puede hacer la experiencia con una ciudad sobre el mismo meridiano, es bueno intentar hacerlo con una que esté lo más próxima posible a él. En el caso de Eratóstenes el ángulo β era nulo y sencillamente $\gamma = \alpha$, y como la distancia desde Alejandría a Siena era conocida como ruta de caravanas, pudo deducir el radio de la Tierra dando un resultado muy próximo al correcto.

pasó cerca de veinticinco años trabajando en el desarrollo de su modelo heliocéntrico del universo.

En 1536, Copérnico ya había escrito su libro *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*), que suele estar considerado como una obra clave en

Estoy tan poco enamorado de mis propias opiniones que desprecio lo que otros puedan pensar de ellas.

NICOLÁS COPÉRNICO

la astronomía moderna. Copérnico conservó de Ptolomeo la idea tradicional de un universo finito y esférico limitado por la esfera de estrellas fijas. Asimismo conservó que los movimientos fueran circulares, ya que consideraba que eran los únicos adecuados para la naturaleza de los cuerpos celestes, y mantuvo un único centro común a todos los movimientos celestes, que no era el centro de la Tierra sino el Sol (realmente aceptaba un punto próximo al Sol como centro para explicar la paralaje de las estrellas fijas).

Temeroso de las críticas que pudieran surgir por parte de astrónomos y de la propia Iglesia, Copérnico no publicó su obra en la que defendía el heliocentrismo hasta 1543, año de su fallecimiento. La obra apareció pocas semanas antes de su muerte y la precedía un prefacio anónimo, obra del editor Andreas Osiander, en el que el sistema copernicano se presentaba como una hipótesis, como medida de precaución. Sin embargo, sus libros serían incluidos en el *Index librorum prohibitorum*, muchos años después de que muriera.

A Copérnico le correspondió el mérito de iniciar la destrucción del sistema ptolemaico. Con el aumento de las observaciones se habían hecho necesarios unos ochenta círculos (epíciclos, excéntricos y ecuantes) para explicar el movimiento de siete planetas errantes (cinco planetas propiamente dichos, más el Sol y la Luna), sin conseguir a pesar de todo previsiones lo suficientemente exactas. En cambio, la hipótesis heliocéntrica eliminaba muchas dificultades. Copérnico seguía pensando que los planetas, al moverse alrededor del Sol, describían órbitas circulares uniformes y justificaba su heliocentrismo por la necesidad de conservar la perfección divina y la belleza del movimiento de

los astros, de modo que en el centro de «este espléndido templo, el universo, no se podría haber colocado esa lámpara (el Sol) en un punto mejor ni más indicado».

Copérnico situaba la Tierra girando con el resto de los planetas alrededor del Sol, lo que chocaba con la tradicional oposición entre un mundo celeste inmutable y un mundo sublunar sujeto al cambio y al movimiento. Este sin duda fue un primer paso en las concepciones renacentistas que buscaban una interpretación racional de las relaciones entre el universo, la Tierra y el hombre. Y comenzaba el camino para distinguir entre ciencia y magia, así como entre astronomía y astrología.

La Tierra se movía, y lo hacía con una serie de movimientos distintos: el movimiento de rotación, el de traslación y la inclinación de su eje que sirve para explicar los equinoccios. Copérnico planteaba sus hipótesis diciendo que no existe un centro único de todas las esferas celestes, y que además el centro de la Tierra no es el centro del universo. Asimismo, cualquier movimiento que pareciera realizado en la esfera de las estrellas era consecuencia de que la Tierra se movía, dando cada día una vuelta completa, mientras que la esfera de las estrellas permanecía inmóvil. Asimismo, los movimientos del Sol no se deben a él, sino a la Tierra que gira a su alrededor, igual que el resto de planetas; adicionalmente, los movimientos retrógrados y directos de los planetas son también consecuencia del movimiento de la Tierra. Así pues, plantear la hipótesis de que esta se mueve servía para explicar muchas de las irregularidades de los movimientos del universo y suprimía los antiguos problemas y en consecuencia las complicadas herramientas como los epiciclos, ecuantes, esferas celestes, etcétera.

KEPLER, DE LOS SÓLIDOS PLATÓNICOS AL HELIOCENTRISMO

Después de estudiar teología y astronomía, Johannes Kepler, protestante luterano, se hizo un firme partidario del modelo copernicano; esto no le procuró amigos, y menos entre los luteranos, pero intentó demostrar que el movimiento de los planetas

debería cumplir las leyes pitagóricas de la armonía, teoría conocida como «música de las esferas».

Kepler fue un personaje peculiar, de salud frágil, destacando por su gran inteligencia y sus excelentes habilidades matemáticas. Su interés por la astronomía se inició en su infancia. Con cinco años, observó el cometa de 1577, después de que su madre lo llevara a un lugar alto para verlo. Su padre le mostró a la edad de nueve años el eclipse de Luna de 1580, y él recordaba que esta aparecía bastante roja, fenómeno que estudió más tarde. Su padre era soldado mercenario y su madre curandera, herborista y llegó a ser juzgada por brujería.

De largo, prefiero la crítica más aguda de un único hombre inteligente que la aprobación irreflexiva de las masas.

JOHANNES KEPLER

Graz, publicó su libro *Mysterium cosmographicum*, del que envió varios ejemplares a Galileo (que posiblemente no lo leyó) y al danés Tycho Brahe (1546-1601), quien quedó muy impresionado. Este último proponía una tercera solución, que mezclaba los sistemas de Ptolomeo y Copérnico. Según él, los planetas giraban alrededor del Sol y este alrededor de la Tierra, que seguía ocupando el centro del universo.

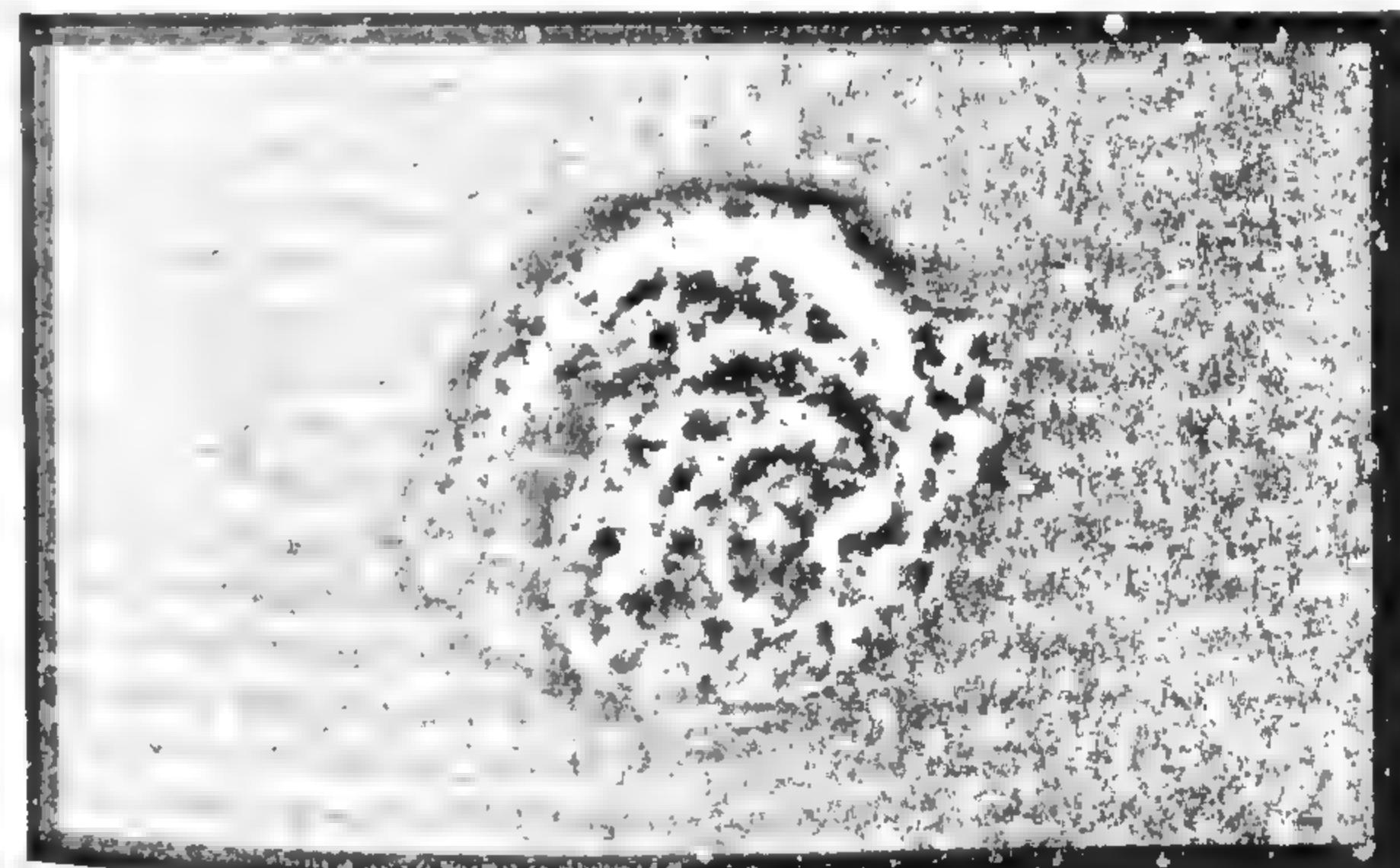
En el año 1600, Kepler fue obligado a abandonar Austria, cuando el archiduque Fernando promulgó un edicto contra los protestantes. Y ese mismo año fue invitado por Tycho Brahe para trabajar con él en Praga. Brahe, astrónomo imperial de Rodolfo II, había montado el mejor centro de observación astronómica de esa época y disponía pues de los mejores datos de observaciones planetarias. El problema era que tenían dos caracteres completamente diferentes y les resultaba difícil trabajar juntos. Tycho Brahe era extrovertido, descarado, muy seguro de sí mismo y tan atrevido como para batirse en duelo, actividad que en su juventud le llevó a perder la nariz, que sustituyó por una prótesis metálica. Tenía muy buena vista, lo que le facilitaba hacer observaciones astronómicas difíciles, y disponía de los datos de observación que Kepler necesitaba y de los que carecía.

SN 1604, LA ESTRELLA DE KEPLER

Si Copérnico dio al traste con los conceptos del mundo heredados de Aristóteles y Ptolomeo, Kepler les suministró otro golpe más, personificado en la idea de que los cuerpos celestes no seguían círculos con movimiento uniforme. Por su parte, la inmutabilidad del firmamento también se vería puesta a prueba, pero por algo que no fue consecuencia del modelo desarrollado por Kepler, sino que fue un fenómeno casual, que este estudió en particular: la explosión de una supernova.

El gran estallido

El 17 de octubre de 1604, Kepler observó una supernova en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Se sabe que otros muchos astrónomos la observaron y dejaron constancia de ello, pero Kepler, seguramente inspirado por la forma de trabajar de Tycho Brahe, fue el único que realizó un estudio con todo detalle del fenómeno, que publicó en su obra *De stella nova in pede Serpentarii*. Más tarde sería conocida como la estrella de Kepler. Esta supernova proporcionó evidencias de que el universo no era estático sino que estaba sometido a grandes cambios. Esta nueva estrella pudo observarse a simple vista durante año y medio después de su primera aparición. Ahora se sabe que dista 13 000 años-luz de la Tierra. Con posterioridad a ella no ha sido observada otra supernova dentro de nuestra galaxia, de modo que es posible que un día de estos algo así ocurra.



El remanente (nube de «escombros») de la supernova de Kepler, SN 1604. La foto abarca longitudes de onda en la banda infrarroja y en la de los rayos X.

Inicialmente, Tycho Brahe le ocultaba información y solo mencionaba de pasada algunos datos, con cuentagotas, pero por fin, tras algunas quejas de Kepler, los compartió de buena gana. A su muerte, Kepler lo sustituyó en el cargo de matemático imperial de Rodolfo II y también trabajó frecuentemente como su consejero astrológico.

Kepler, a la vista de los datos planetarios y particularmente de los relativos al movimiento retrógrado de Marte, se dio cuenta de que el movimiento de los planetas no podía ser explicado con círculos: lo intentó con óvalos, sin éxito, y finalmente empleó elipses. Con ellas formuló sus famosas leyes que describen el movimiento de los planetas, publicadas en *Astronomia nova* y en *Harmonices mundi*:

- *Primera ley de Kepler*: Los planetas mantienen movimientos elípticos alrededor del Sol, que está situado en uno de los dos focos de la elipse (1609, *Astronomia nova*).
- *Segunda ley de Kepler*: Las áreas barridas por los radios que dan la posición de los planetas son proporcionales al tiempo que utilizan estos en recorrer el perímetro de las áreas mencionadas (1609, *Astronomia nova*).
- *Tercera ley de Kepler*: El cuadrado de los períodos de la órbita de cada planeta es proporcional al cubo de la distancia media al Sol (1618, *Harmonices mundi*).

También dedicó muchos años a la labor de preparar y publicar, en 1627, las *Tabulae Rudolphinae* (*Tablas Rudolfinas*), que durante más de un siglo se usaron en todo el mundo para calcular las posiciones de los planetas y las estrellas. Asimismo, usando sus leyes del movimiento planetario, se predijo correctamente el tránsito de Venus frente al Sol de 1631, con lo que su teoría quedó confirmada después de su muerte. En la última parte de su vida llegó a afirmar que las mareas eran debidas a una atracción que ejercía la Luna sobre los mares, hecho que se demostró años después de su fallecimiento.

Kepler se mostró como uno de los grandes astrónomos de su época y sin él Isaac Newton no hubiera podido desarrollar la teoría de la gravedad, ni existiría la ciencia como hoy la conocemos.

LOS OTROS MUNDOS DE GIORDANO BRUNO

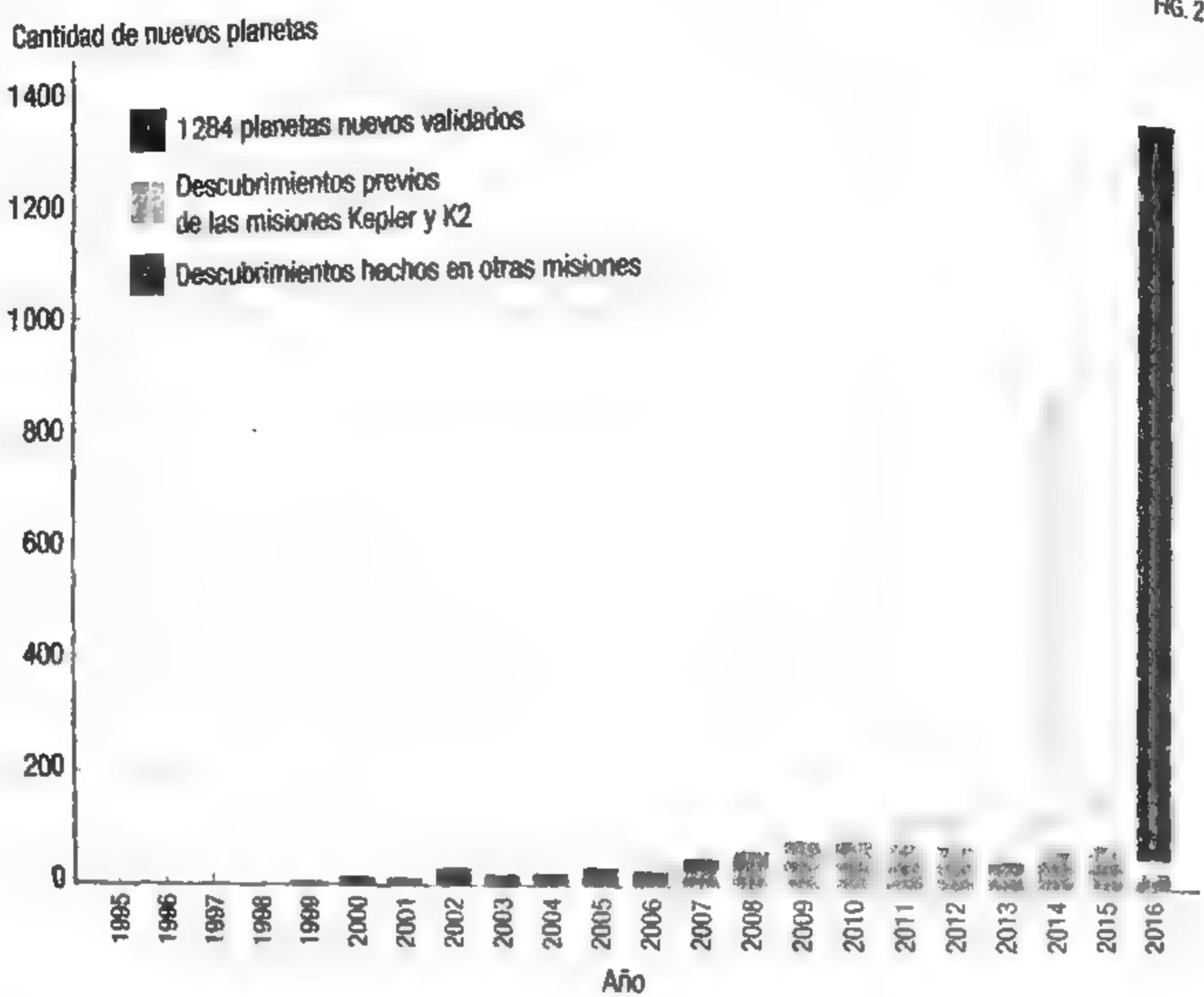
En el siglo xxi los planteamientos cosmológicos van más allá del sistema Tierra-Luna-Sol y del propio sistema solar. Veamos pues otro autor que se adelantó a su tiempo y al que las investigaciones actuales le están dando la razón. En estos momentos, un buen número de astrónomos y científicos están trabajando en la detección de exoplanetas correspondientes a otros sistemas cuya estrella central no es el Sol. De hecho, desde que en 1995 Michel Mayor y Didier Queloz descubrieron el primer exoplaneta orbitando a Pegasi 51, se han detectado miles de ellos.

En marzo de 2009 se lanzaba la nave espacial Kepler. Su objetivo era observar y medir la curva de luz de diversas estrellas en busca de planetas que cruzasen frente a la suya, ocultándola parcialmente y provocando variaciones en su luminosidad. Aunque existen otros, el *método del tránsito* parece indicado para detectar exoplanetas del tamaño de la Tierra, los denominados de *tipo terrestre*, que se cree podrían albergar vida de algún tipo y están considerados en el estudio de las zonas de habitabilidad.

La lista de exoplanetas detectados por la nave espacial Kepler incluye distancias orbitales, masas, radios, composición, habitabilidad (algunos tienen una temperatura superficial que puede permitir la existencia de agua líquida) y tipo de la estrella central. La lista de exoplanetas, alimentada por hallazgos efectuados desde diversas iniciativas de investigación, crece con suma rapidez, de manera que lo mostrado en la figura 2 representa una situación efímera.

Ante esta rotunda demostración de que el Sol no es la única estrella acompañada de planetas, hay que recordar la figura de Giordano Bruno (1548-1600) y sus afirmaciones relativas a la existencia de otros mundos. En su obra *De l'infinito universo e mondî* escribió: «Existen, pues, innumerables soles; existen infinitas tierras que giran igualmente en torno a dichos soles, del mismo modo que vemos a estos siete [planetas] girar en torno a este sol que está cerca de nosotros».

Giordano Bruno no era propiamente un científico, sino un teólogo. Perteneció a la orden religiosa de los dominicos. Nació en



Cantidad anual de descubrimientos preliminares de planetas de fuera de nuestro sistema solar desde 1995 a 2016 y verificación de buena parte de ellos en 2016. Se especifican los descubrimientos previos realizados por las misiones Kepler y K2 de la NASA, los previos no realizados por estas y la validación de 1 284 planetas completada y anunciada en 2016.

Nápoles, viajó a Roma, Ginebra, Lyon, Toulouse, Praga y Oxford, y regresó a Italia. Era un personaje incómodo y complejo que terminó por entrar en conflicto con la Signoria veneciana por su teoría del «universo ilimitado y la infinitud de mundos». Como en el caso de Galileo Galilei, se encontró con Roberto Belarmino como examinador de sus creencias. Finalmente trasladado a Roma, fue condenado por la Inquisición y quemado el 17 de febrero de 1600.

La Inquisición lo acusó inicialmente por sus ideas antidiogmáticas, que ya le habían costado el hábito dominico por sus re-



Arriba, recreación artística del primer planeta descubierto en órbita a la estrella Pegasi 51. Este mundo gira en torno a su sol a muy corta distancia. Abajo, retrato antiguo de Giordano Bruno.

El movimiento del Sol y la arquitectura

Con la suerte de nuestro lado,
podemos apañarnos sin cerebro.

GIORDANO BRUNO

flexiones sobre cuestiones de cosmología y por su rechazo del geocentrismo. El juicio fue interrumpido durante seis meses, tiempo durante el cual Bruno continuó defendiendo activamente su teoría de los infinitos mundos. Hoy en día los astrónomos manejan un universo virtualmente infinito como aventuró Giordano Bruno.

Giordano Bruno desarrolló una nueva visión cosmológica en la que estructuró un universo totalmente abierto al infinito y a una pluralidad

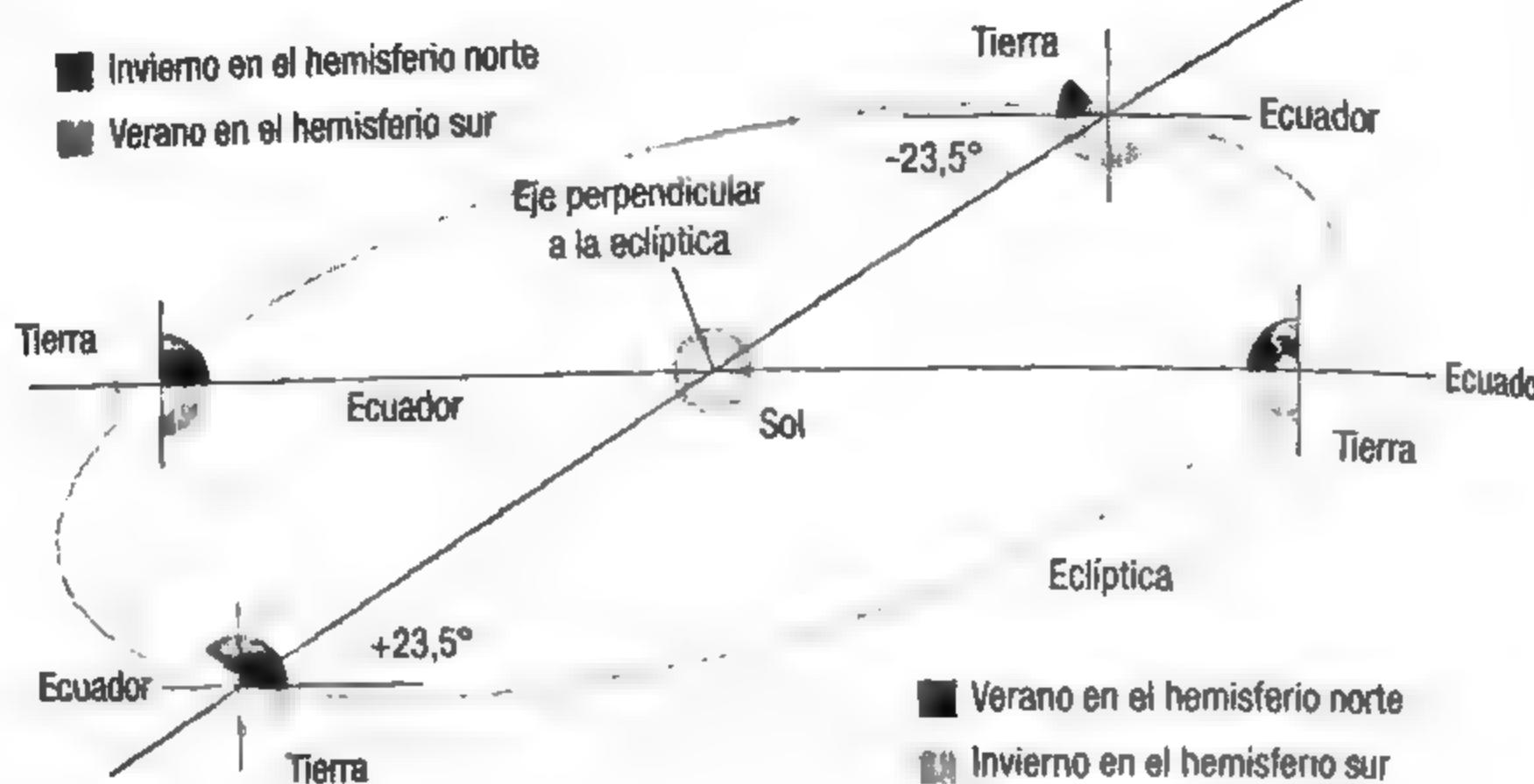
de mundos, enfrentándose a la cosmología tradicional de Aristóteles y Ptolomeo, que mantenían el universo encerrado en una serie de esferas concéntricas. La concepción bruniana terminaba con el esquema de esferas concéntricas que contienen los planetas y las estrellas; en su lugar repartía los astros por todo el espacio y surgía el concepto de un cielo virtualmente infinito donde se distribuyen los innumerables soles y sistemas planetarios.

Tan importantes han sido el Sol y sus movimientos en el cielo que el ser humano ha querido tenerlos en cuenta a la hora de orientar sus construcciones arquitectónicas, otorgando así a ello un simbolismo trascendente.

Los diferentes movimientos de la Tierra hacen que la posición del Sol en el cielo cambie de varias formas. Un cambio muy evidente es el que provoca el ciclo día-noche. Otro, aunque no afecta por igual a todas las zonas del mundo, es el que determina el ciclo de las estaciones. La inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de su órbita en torno al Sol hace que en prácticamente todas las zonas varíe la duración de la noche. La cantidad de tiempo que la zona sí recibe la radiación solar, y también la diferente intensidad con que incide la misma dependiendo del grado de inclinación, son la base principal de la primavera, el verano, el otoño y el invierno. Cada estación en un hemisferio es la opuesta del hemisferio contrario en ese momento (figura 1). Así por ejemplo cuando en el hemisferio boreal es verano, en el austral es invierno. Y cuando en este es primavera, en el boreal es otoño. Cuanto más cerca del ecuador está un lugar, menos se nota en él la diferencia entre estaciones, al menos en lo que a temperatura se refiere. Dependiendo de diversos factores, sí puede haber dos estaciones claramente distintas: una seca y otra lluviosa.

Hay dos momentos del año (los solsticios) en los cuales el Sol alcanza la máxima declinación (distancia angular), que es de poco

FIG. 1



Resumen de los puntos de mayor interés en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, en combinación con la inclinación del eje de rotación terrestre con respecto a su plano orbital. Se indican las estaciones, los solsticios, los equinoccios y la distancia máxima (afelio) o mínima (perihelio) de la Tierra al Sol.

más de 23°, norte o sur, con respecto al ecuador terrestre. La consecuencia más palpable es que la duración del día o la de la noche son las máximas del año. En el primer caso, ello coincide con la mayor altura aparente del Sol en el cielo. En el segundo, con su menor altura aparente.

También hay dos momentos del año (los equinoccios) en los que el Sol se posiciona de tal modo en el cielo que para un observador en el ecuador alcanza el cenit (el punto más alto con respecto a dicho observador, justo sobre su cabeza, o sea con un ángulo de 90°).

Es interesante observar que el Sol no sale y se pone todos los días en la misma posición y que, por lo tanto, esta solo coincide de manera exacta con el este y el oeste, respectivamente, dos días al año (los de los equinoccios). El resto de días dicha posición se halla en el noroeste o sudeste al alba y en el noroeste o sudoeste al ocaso.

El paso del Sol por el cenit no es observable en toda la Tierra. Se dice que el Sol pasa por el cenit cuando se encuentra justo

encima de nuestras cabezas, es decir, cuando alcanza una altura de 90° sobre el horizonte.

Este fenómeno ocurre solamente en los países situados entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, y las fechas varían dependiendo de la latitud. Por ejemplo, en Copán (latitud 14° N), Honduras, el primero tiene lugar entre los meses de abril y mayo, días después del equinoccio de primavera, mientras que el segundo paso por el cenit tiene lugar en el mes de agosto, después del solsticio de verano.

Cuando el Sol alcanza una altura de 90° sobre el horizonte, los rayos del Sol se proyectan perpendiculares, por lo que se experimenta un aumento de la temperatura ambiental. Cuando el Sol pasa por el cenit, los objetos verticales en la superficie terrestre dejan de proyectar su sombra en el mediodía solar, debido a que los rayos solares caen perpendiculares en ese momento.

Los mayas creían que el Sol servía como marcador del tiempo. En este sentido, su paso por el cenit era un evento relevante como indicador de la temporada de lluvias, por lo que debían preparar las tierras para la siembra. Por otra parte, cuando el Sol se trasladaba de norte a sur, un segundo paso cenital les señalaba que todo estaba listo para la cosecha. En otras culturas, el paso del Sol por el cenit también cobró relevancia.

Este fenómeno no sucede en todos los lugares de la Tierra. En buena parte de las latitudes europeas no ocurre porque al ser superiores a 40° dan lugar a que el Sol nunca pueda pasar de manera totalmente perpendicular sobre la superficie.

ORIENTACIÓN EN LA ARQUITECTURA EGIPCIA

La orientación de los edificios en muchas ocasiones tiene en cuenta criterios astronómicos para aprovechar la iluminación de manera práctica. La arquitectura del antiguo Egipto, sin embargo, respondía en muchos aspectos a una visión religiosa del mundo. En general, los templos egipcios se construían sobre un eje orientado de este a oeste, de tal modo que el Sol salía por el

lugar más sagrado (la cámara del dios) y se ponía entre los pilones de la entrada, aunque existan excepciones, como es el caso del templo de Lúxor. En el oeste, donde muere el Sol, estaba el mundo de los muertos, de modo que las tumbas estaban orientadas con la cabeza del difunto mirando al oeste. El trazado norte-sur del Nilo hacía que la orientación también afectase a sus dos orillas y que las tumbas se situaran en el lado oeste, donde estaba el Valle de los Reyes.

La arquitectura del antiguo Egipto, en especial sus pirámides y otros monumentos espectaculares, ha sido objeto de numerosos estudios. Una serie de investigaciones particularmente exhaustivas sobre el uso de criterios astronómicos en la orientación de algunos monumentos y que han despertado un notorio interés son las llevadas a cabo en años recientes por un equipo en el que han participado Juan Antonio Belmonte (del Instituto de Astrofísica de Canarias), A. César González García (de la Universidad Autónoma de Madrid) y otros expertos de instituciones como por ejemplo el Instituto Nacional de Investigación en Astronomía y Geofísica de Egipto. Tras medir las orientaciones de 350 templos a lo largo de la geografía egipcia correspondientes a diferentes períodos de la historia, lo que representa un 98% de ellos, Belmonte y sus colegas cuentan ya con los siguientes resultados generales: los templos del valle del Nilo y del delta se orientan de acuerdo con el curso del río; los ejes de los edificios son perpendiculares a este curso y normalmente sus puertas están enfrentadas al Nilo, lo que coincide con la cosmovisión que los egipcios tenían del mundo.

Tras sucesivos análisis en esta línea de investigación, se puede ver que los templos también estaban orientados astronómicamente, pero esas orientaciones seguían tres posibles patrones, válidos en la mayor parte de la historia egipcia y en las diferentes zonas del país:

— Uno seguramente estaba relacionado con diferentes configuraciones celestes de las estrellas de Meskhetyu, para obtener una orientación cercana a la línea meridiana o, en ocasiones, de forma precisa hacia el norte.

- El segundo tenía un carácter marcadamente solar y se basaba en la orientación a jalones temporales singulares del ciclo anual y del calendario civil.
- Un tercer patrón incluía las dos estrellas más brillantes del cielo egipcio, Sirio y Canopo (Canopus).

Muchas veces, los templos de los dioses solares presentan orientaciones predominantemente solares y, en cambio, los correspondientes a divinidades femeninas se orientan de forma habitual hacia las estrellas más brillantes del cielo, en particular a Sirio.

En ocasiones singulares de la historia de Egipto, las orientaciones solares se adaptaron para que coincidieran con los solsticios de verano e invierno o el equinoccio de primavera u otros días especiales para los antiguos egipcios. Así sucede con algunos templos de Tebas, incluyendo por ejemplo el de Karnak.

ORIENTACIÓN EN LA ARQUITECTURA ROMANA

Marco Vitruvio Polión (ca. 70 a.C.-15 a.C.) fue en su juventud arquitecto de Julio César, siendo muy conocido por su tratado sobre arquitectura, el más antiguo que se conserva, titulado *De architectura*: en 10 libros trata sobre órdenes, materiales, técnicas decorativas, construcción de edificios, hidráulica, gnomónica y máquinas.

Vitruvio ofrece en ellos distintas soluciones de orientación para los templos romanos y detalla cómo se construían los campamentos romanos *castrum*, que en muchas ocasiones fueron el origen de múltiples ciudades europeas.

Los campamentos del ejército del Imperio romano siempre fueron edificados según un cierto modelo, de planta rectangular y con dos direcciones principales que se cruzaban. Las dos vías principales eran: el *cardus maximus*, de norte a sur, y el *decumanus maximus*, de este a oeste, quedando el campamento dividido en cuatro partes iguales. En los extremos de las avenidas se abrían cuatro portales en la muralla. Paralelas a las principales se abrían las demás calles y construcciones, originando una

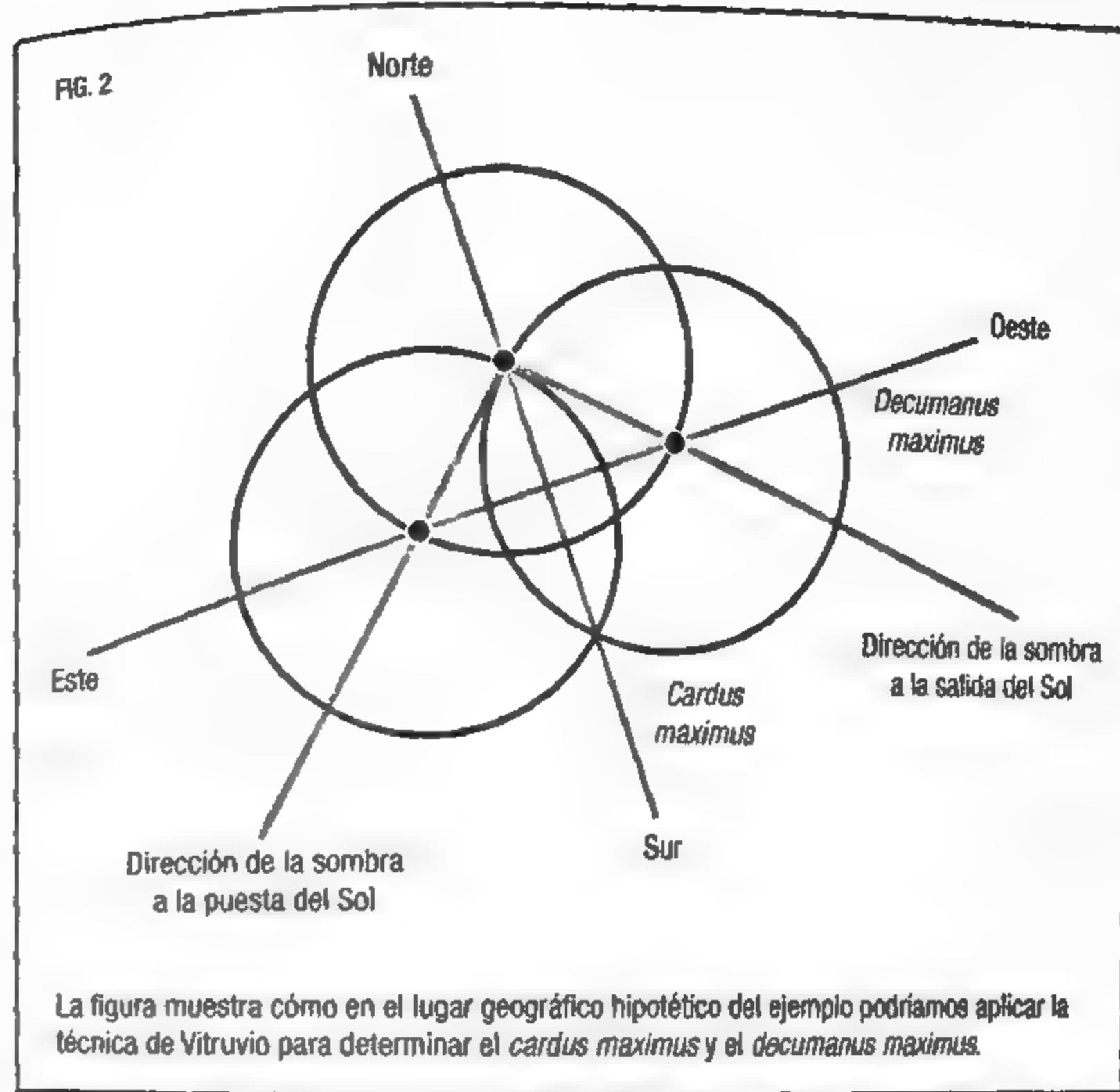
cuadrícula que después se puede reconocer en muchas ciudades cuyo origen fue un *castrum*.

El mismo Vitruvio menciona que se pueden dar excepciones a la orientación norte-sur, que es la preferente, según sean los vientos dominantes en la zona, para evitar que trascurran en la misma dirección que las calles, y recoge que es mejor oponer los muros a dichos vientos. Las casas se construían a un lado y otro de las calles, y no se adosaban a la muralla, sino que creaban un pasillo que servía para facilitar el acceso a esta en caso de peligro. En el cruce del *cardum* y el *decumanum* solía situarse el foro, esto es, el centro de la ciudad, donde se construía una gran plaza de reunión pública con los comercios, el templo y los edificios institucionales. Este esquema reticular era práctico y se adaptaba bien a los usos de los campamentos y de las ciudades.

Esta estructura de los campamentos romanos fue el modelo empleado por los primeros europeos en América cuando construyeron las nuevas ciudades.

Método de Vitruvio para determinar la dirección norte-sur

Según Vitruvio, una vez decidido el lugar central de una ciudad o de un campamento militar, se debía determinar la dirección norte-sur para fijar el *cardus maximus* y establecer la orientación este-oeste. Para ello, partían de una estaca o un poste vertical clavado en el suelo (figura 2) en torno al cual, y con la ayuda de una cuerda a modo de compás, trazaban una circunferencia. Debía ser lo bastante grande como para que el extremo de la sombra proyectada del poste pudiese tocar la circunferencia a primera hora de la mañana y, además, marcar en otro punto el extremo de la sombra del poste a última hora de la tarde. Estos dos puntos se marcaban con dos nuevos postes o estacas, en torno a los cuales se trazaban dos nuevas circunferencias del mismo radio, cuya intersección permitía marcar la dirección del mediodía, la dirección norte-sur (*cardus maximus*), y perpendicular a ella, el *decumanus maximus*, pasando por los puntos cardinales este y oeste.



La figura muestra cómo en el lugar geográfico hipotético del ejemplo podríamos aplicar la técnica de Vitruvio para determinar el *cardus maximus* y el *decumanus maximus*.

ORIENTACIÓN EN IGLESIAS CRISTIANAS

Según el Concilio de Nicea (325 d.C.) las iglesias cristianas debían estar orientadas con el ábside hacia oriente, es decir, el sacerdote debía estar situado mirando hacia oriente durante los oficios. El propio san Atanasio de Alejandría, también en el siglo IV, hizo constar que el sacerdote y los participantes deben estar situados mirando hacia el este, «de donde Cristo, el Sol de Justicia, brillando en el final de los tiempos». Por su parte, santo Tomás de Aquino dio las razones que justificaban la regla de la orientación en los templos cristianos.

Sin embargo, hay algunas iglesias que no verifican exactamente esta orientación hacia el este, la salida del Sol el día de los equinoccios, y ello se puede interpretar de diversas maneras. Algunas

se orientan hacia la salida del Sol el día que se inicia la construcción de la iglesia o hacia la salida del Sol el día del santo patrón.

Se puede citar una excepción relativa a las primeras iglesias construidas en la época de Constantino, las cuales tienen casi todas ellas el ábside dirigido al oeste. En esos casos, durante los

oficios, la posición del sacerdote era aquella que miraba al este y hacia el público, pues el altar se encontraba entre oficiante y asistentes.

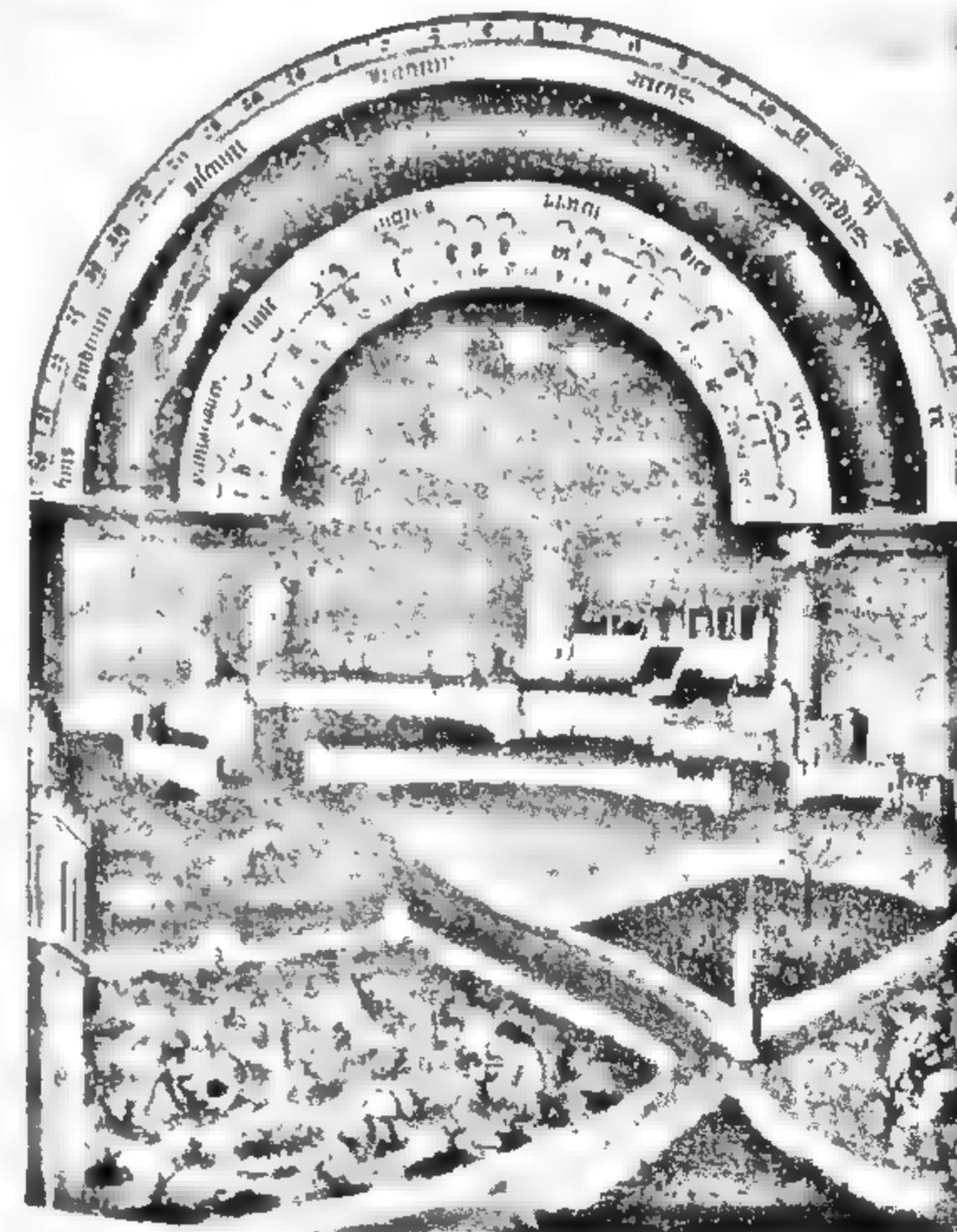
En los primeros siglos del cristianismo, las recomendaciones de la Iglesia (por ejemplo en el siglo V) eran muy claras, indicando como se ha dicho que el ábside debía estar mirando hacia el este, hacia la salida del Sol en el equinoccio, porque Cristo, como Sol de Justicia, surgirá desde allí en el Juicio Final. Mientras, la orientación hacia los solsticios estaba relacionada con los numerosos templos paganos orientados en esas direcciones. Conviene reseñar que se dan algunos equívocos debido a la reforma del calendario, que hace que el día del equinoccio no sea el mismo si se utiliza el calendario reformado o no.

En ciertas órdenes religiosas, durante la Baja Edad Media, se orientaba según el santo patrón; solía ocurrir, en general, en iglesias monacales románicas, aunque en ocasiones también se daba en catedrales góticas, estas ya mucho más tardías. Mientras, las iglesias mozárabes, inmediatamente posteriores al tiempo de al-Ándalus, tendían a evitar aquellas orientaciones que confundieran estos templos con mezquitas. Por tanto, en ciertas circunstancias especiales, las orientaciones podían ser alteradas.

Finalmente, como menciona en uno de sus estudios J.A. Belmonte, en Lanzarote hay bastantes iglesias orientadas en dirección norte-nordeste, lo que resulta otra excepción a la regla de orientación con el ábside al este. Después de analizar diferentes posibilidades para explicar esta situación se concluyó que el argumento más razonable sería evitar los fuertes vientos dominantes en la isla, procedentes precisamente de esa dirección, sorteando que la arena desplazada por ellos pudiera acumularse e inhabilitar la puerta si se orientaba el ábside al este y, en consecuencia, la puerta al oeste.

Protegidos de la persona de un solo libro.

TOMÁS DE AQUINO



Arriba, la posición del Sol es la base de los relojes de sol. En un reloj de esta clase, como el del ejemplo aquí mostrado, la sombra proyectada sobre una superficie con las horas diurnas manejables indicadas en ella marca la hora actual. A la izquierda, página de la obra medieval *Las muy ricas horas del duque de Berry*, donde figura la posición del Sol sobre el fondo de constelaciones.

Con el paso de los siglos la orientación astronómica de las iglesias acabó perdiéndose, salvo en los casos en los que se aprovechaban los cimientos de construcciones anteriores y se conservaba la orientación primitiva, que no son pocos. En muchos otros se construyó sin atender a la orientación este-oeste, aunque sin renunciar de una manera formal a esa regla. Simplemente no se aplicaba. Además, en la actualidad, los templos se construyen según las leyes de urbanismo y en el solar disponible, de forma que la situación de la puerta de acceso corresponde a la posición donde esté la calle, en lugar de por razones astronómicas vinculadas a interpretaciones religiosas.

En cualquier caso, el movimiento del Sol y la trayectoria del mismo sobre el horizonte organizaron la estructura de la vida cotidiana en el interior de los monasterios de la Edad Media. Por ejemplo, en el siglo VI san Benito de Nursia estableció la regla benedictina que distribuye el horario del monasterio con arreglo a la posición del Sol.

ORIENTACIÓN DE LAS MEZQUITAS

Desde los orígenes del islam se ha afirmado que las mezquitas se orientan según La Meca. Sin embargo, si se analizan las orientaciones de varias mezquitas se descubren considerables variaciones, lo que resulta sorprendente dados los altos conocimientos astronómicos que tenían sus constructores.

Antes de seguir es conveniente mencionar a modo de ejemplo que La Meca supone un ángulo de 11° de desviación respecto al sur en la dirección este en Córdoba (España) y un poco más de 1° si estuviéramos en Marrakech (Marruecos). Sin embargo, se observa una fuerte tendencia a desviar la dirección de La Meca. Así, en el caso de al-Ándalus, podía considerarse correcto rezar hacia cualquier punto del cuadrante SE, no por una incapacidad para encontrar la orientación precisa sino más bien atendiendo a otros criterios: para diferenciarse de los cristianos, que orientaban sus iglesias hacia el este, o por orientar las mezquitas no «hacia» la Kaaba, sino «como» la Kaaba, que es la Mezquita Sagrada

de La Meca y que tiene una orientación sur-sureste (60° al sur de la dirección este, determinada por el orto de la estrella Canopo).

Seguramente, en la fundación de una mezquita los alfaquíes tratarían de imponer la solución más conservadora y con ello conseguir distinguirse de los cristianos, dando una orientación de 45° en adelante (siempre medidos a partir de la dirección este hacia el sur), llegando en algunos casos hasta los 90° , es decir, dirección sur. De hecho, si se reconvertía un templo cristiano en mezquita (que lógicamente tendría su ábside orientado hacia el este), se ponía el mihrab en el muro sur (aunque la orientación este se aproximara más a la dirección de La Meca) para no rezar en la misma dirección en la que lo habían hecho los cristianos.

Es curioso el caso de la Kutubía de Marrakech. En las guías turísticas se explica que aquel edificio fue erigido, en principio, en 1147, con una orientación de 64° , y que, tan solo quince años más tarde, fue derrumbado para corregir el ángulo y ajustarlo mejor en dirección a La Meca. Lo cierto es que hubiera sido suficiente corregir dicha orientación en tan solo $1^\circ 30'$. Pero la derribaron para girarla más hacia el sur (ahora tiene 69°), si bien el criterio que les guio no fue el de dirigirla hacia la Kaaba, sino orientarla como la Kaaba, siguiendo el orto de Canopo, que en Marrakech es, efectivamente, 69° . Se dan, pues, diversas circunstancias que hacen que las orientaciones varíen en el cuadrante sur-este.

Tal como sucedía con los momentos de los rezos a lo largo del día en muchos monasterios, las horas de oración de los musulmanes están estrechamente relacionadas con el movimiento del Sol.

ORIENTACIÓN DE LAS EDIFICACIONES MAYAS

Para los mayas la astronomía regulaba la vida cotidiana. El Sol, la Luna y las estrellas eran dioses que recibían adoración y sacrificios, y la forma en que interactuaban dictaba cuándo había que sembrar, cosechar y guerrear.

En las ruinas de Copán, Honduras, las orientaciones y observaciones astronómicas realizadas por los mayas se reflejan en

el diseño y construcción de los monumentos del tipo conocido como estela en la plaza del Sol. El movimiento aparente del Sol está presente sobre todo en los equinoccios, solsticios y en el paso por el cenit. Muchas de las estelas interaccionan con los altares para señalar las observaciones de equinoccios y solsticios, en las salidas y puestas del Sol.

El paso del Sol por el cenit es solo conocido en las latitudes lo bastante próximas al ecuador. En particular, los mayas observaron este fenómeno que se caracteriza porque el Sol alcanza su punto más alto en el cielo, es decir, pasa por el meridiano del lugar, cuando se encuentra en el cenit (a 90° sobre nuestras cabezas). En consecuencia, los rayos solares inciden sobre los objetos verticales sin producir sombra cuando el Sol está en el punto máximo de tal evento astronómico durante el mediodía solar.

Aunque no siempre la orientación de los edificios corresponde a los equinoccios o solsticios. Por ejemplo, el templo de los Jaguares de Chichén Itzá está orientado hacia la puesta de Sol, pero no en los equinoccios ni en los solsticios, sino que hay dos fechas en las que el Sol entra alineado al templo y lo ilumina por dentro: el 29 de abril y el 13 de agosto. Estas fechas no tienen un significado astronómico especial, pero en muchas partes de Mesoamérica las orientaciones se dan en fechas que aparentemente no tienen que ver con la astronomía.

Tampoco coinciden con el paso por el cenit. En Chichén Itzá, cuya latitud es de 20,5°, el paso cenital corresponde a los días 23 de mayo y 19 de julio.

Una posible explicación acerca del interés por orientar según las fechas 29 de abril y 13 de agosto se halla en la división del año solar. Estas fechas responden a 52 días antes del solsticio y a 52 días después. Entonces, el año solar se divide en 52, 52 y 260 días (donde los 260 días responden al año ritual). La estructura del calendario se consideraba de origen divino, así pues este tipo de consideraciones podían ser positivas desde el punto de vista político aunque la base astronómica fuese más forzada.

El campo para el juego de pelota de Chichén Itzá data de 864 d.C. y es el de mayores dimensiones del mundo maya (120 metros de longitud). Después de las últimas restauraciones

de los cinco pasajes que hay en él, se ha observado que los centrales están orientados según los equinoccios, mientras que los pasajes hacia el norte lo están según el solsticio de verano y los otros hacia el solsticio de invierno.

Para los mayas el Sol fue un elemento de suma importancia en su ritualidad, la pelota era una analogía del Sol y los movimientos del juego lo eran del trayecto del astro. Así, el curso del Sol, es decir, que salga por el oriente, llegue al cenit y se oculte por el poniente, se reproducía con el movimiento de la pelota durante la práctica del ritual. Como la pelota simbolizaba el Sol, durante el juego debía estar en constante movimiento, para no interrumpir el ciclo natural de la vida.

Los movimientos del Sol, en definitiva, marcaron no solo la vida cotidiana de las culturas antiguas sino también muchas de sus ideas religiosas.

Las matemáticas son el lenguaje con el que los dioses hablan a las personas.

PLATÓN

Eclipses y fases lunares

Si hay un fenómeno astronómico que ha fascinado a la humanidad, ese es sin duda el de los eclipses de Sol y de Luna. Han estado presentes en la cultura de las civilizaciones, y también han contribuido grandemente al desarrollo científico.

Hace más de 5 000 años, los sacerdotes-astrónomos (o más bien astrólogos) de Babilonia observaban el cielo, identificando todas las estrellas brillantes, detectando periodicidades de los movimientos de ciertos astros y registrando otros fenómenos, como fue el paso del cometa Halley en 164 a.C.

Esencialmente, querían conocer la posición de los astros en un momento dado y de una forma mecánica, lo que propició el uso de las efemérides, pero sin buscar una explicación geométrica, como hicieron los griegos con posterioridad y usando en muchos casos las observaciones de los babilonios. Para orientarse más fácilmente, asociaban grupos de estrellas próximas e inventaban *constelaciones*, algunas de las cuales han llegado hasta nosotros, como Leo, Tauro, Escorpión o Capricornio. Uno de los ciclos que observaron en el cielo fue el de la Luna, que duraba 28 días y estaba repartido en cuatro partes que se corresponden con sus cuatro fases: *nueva, creciente, llena y menguante*.

La Luna tiene un movimiento de rotación y otro de traslación alrededor de la Tierra que duran aproximadamente lo mismo, esto es unas cuatro semanas. Por este motivo, desde la Tierra solo podemos ver aproximadamente la mitad de la superficie lu-

nar. El movimiento de rotación lunar dura 27 días, 7 horas, 43 minutos y 11,5 segundos. El movimiento de traslación de la Luna en torno a la Tierra dura 29 días, 12 horas, 44 minutos y 3 segundos. Como no coinciden exactamente, en realidad vemos algo más de media superficie lunar, que corresponde al 59%.

La tablilla de *Mul Apin* establece un catálogo de estrellas y constelaciones, así como métodos para determinar el orto helíaco de las mismas. La tablilla *Gu* enumera las estrellas, da su ascensión, su tiempo de pasaje, y nombra las estrellas del cenit. Por su parte, la tablilla de *Ammisaduqa* proporciona datos sobre el movimiento de Venus, que es periódico, reproduciéndose cada 21 años, además de constatar por primera vez que la estrella de la mañana y la estrella de la tarde son el mismo astro. Hay además docenas de tablillas de arcilla donde figuran observaciones de multitud de eclipses.

Durante el reinado de Nabonassar (747 a.C.-734 a.C.) las observaciones de los caldeos mejoraron. Realizaron un mayor número de ellas y de mejor calidad, estudiando de forma sistemática los fenómenos astronómicos que creían eran importantes para la adivinación, y ello los condujo al descubrimiento de los ciclos periódicos que separan dos eclipses lunares. De hecho, Ptolomeo fijó el inicio de su calendario en el comienzo del reinado de Nabonassar, suponiendo que estas observaciones eran las primeras que se podían considerar suficientemente fiables. Las predicciones estaban basadas en la posición de la Luna en el cielo y se aplicaban generalmente al futuro del país, las cosechas, las guerras o las epidemias.

Entre los principales descubrimientos de los astrónomos caldeos hay que mencionar el ciclo de los eclipses o *ciclo de saros*, el cual abarca un periodo de 223 lunas, es decir, unos 6585,32 días (equivalente a unos 18 años y 11 días). Al término de cada ciclo, nuestro planeta y su satélite se hallan aproximadamente en el mismo lugar de su órbita y, por lo tanto, los eclipses vuelven a repetirse otra vez.

Los eclipses tienen lugar cuando el Sol, la Tierra y la Luna están casi alineados, produciéndose los de Sol solo en luna nueva y los de Luna solo en luna llena. Son particularmente curiosas

las coincidencias, que pueden parecer un tanto sorprendentes, de los ciclos de saros.

Los saros presentan en promedio 84 eclipses, 42 de Sol y 42 de Luna. Los eclipses de Sol se distribuyen en 14 *parciales* y 28 *centrales (totales, anulares o mixtos)*. Los eclipses de Luna se distribuyen en 14 *penumbrales*, 14 *parciales* y 14 *totales*. Todo ello en promedio. En ocasiones no llegan a la media, y con el transcurso del tiempo van alcanzándola y luego la superan, a lo largo de un ciclo de unos 600 años de duración. Las irregularidades de la órbita de la Luna cambian la sucesión del tipo de los eclipses, y además su número en un saros puede verse modificado, observándose saros pobres de 78 y saros ricos de 94.

Para esta astronomía de posición necesitaban medir el cielo. Es muy posible que calcularan cuántas lunas o soles (que vistos desde la Tierra miden el mismo tamaño) eran precisos a la hora de completar dicha medida, y así obtuvieran 360 de esos espacios en total. De ahí probablemente se deriva la división de la circunferencia en 360°, dando pie al *sistema sexagesimal*.

El sistema sexagesimal es un sistema de numeración posicional que emplea como base el número 60. Se usó y se usa esencialmente para medir ángulos (grados, minutos y segundos) y tiempos (horas, minutos y segundos). Era común medir el ángulo de elevación de un astro y sus coordenadas con esta base de numeración. El número 60 tiene muchos divisores (1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30 y 60), de hecho es el número más pequeño que es divisible por 1, 2, 3, 4, 5 y 6, y por esa razón facilitaba mucho las medidas y los cálculos con fracciones y proporciones de segmentos.

La astronomía griega tomó muchos conocimientos y datos de observación de los caldeos, como se puede observar en los trabajos de Aristarco, Hiparco y Ptolomeo. Se cree que los descubrimientos de los caldeos llegaron a Grecia poco después de la conquista del Imperio persa por Alejandro Magno, lo que permitió el intercambio de conocimientos entre ellos. Por ejemplo, Aristarco de Samos utilizó el ciclo de saros para determinar la duración del año, mientras que Hiparco comparó las observacio-

nes de eclipses realizadas por los caldeos con las suyas propias y estuvo entre los primeros que utilizaron el círculo de 360° y el sistema sexagesimal.

Pero fue durante el califato omeya que los árabes emplearon ya el sistema sexagesimal para la medición de ángulos, para usos de trigonometría y geometría, así como para la medida del tiempo de una forma un tanto evolucionada desde los tiempos de los caldeos. De hecho, fueron precisamente los árabes quienes reafirmaron la utilización de este sistema, ya que durante casi 500 años desplegaron en gran medida un importante potencial científico. Los árabes pusieron las bases del sistema sexagesimal tal y como lo usamos en la actualidad.

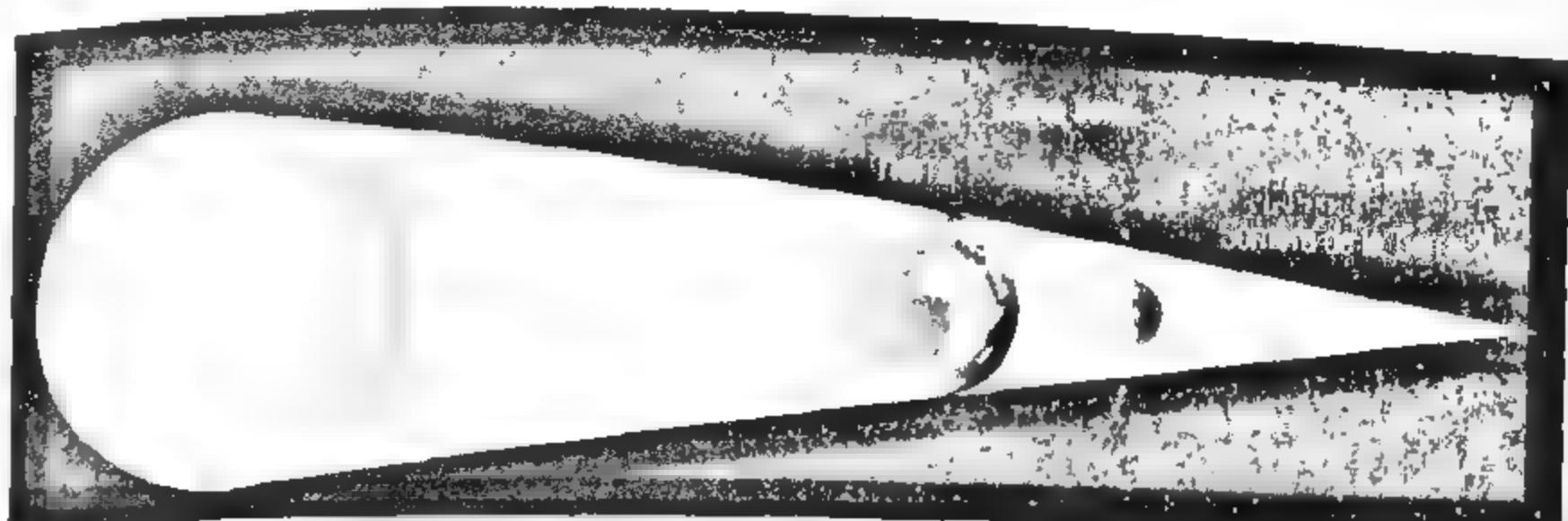
ECLIPSES DE LUNA Y DE SOL

El término «eclipse» se utiliza para dos fenómenos muy diferentes. Sin embargo, en todos los casos estos tienen lugar cuando la posición relativa de la Tierra y la Luna (cuerpos opacos) interrumpe el paso de la luz solar.

Los eclipses de Luna (figura 1) se producen cuando la Luna pasa a través de la sombra de la Tierra, es decir, cuando la Luna está en el lugar opuesto al Sol. Por lo tanto, los eclipses lunares se dan siempre en la fase de luna llena. Los eclipses de Sol, en cambio, suceden cuando nuestra estrella queda tapada por la Luna, que se sitúa entre ella y nuestro planeta (figura 2). Los eclipses de este tipo, que son los que despiertan mayor interés popular, siempre ocurren en luna nueva.

La Tierra y la Luna se mueven siguiendo órbitas elípticas que no están en el mismo plano. La órbita de la Luna está inclinada 5° respecto al plano de la eclíptica (el plano de la órbita de la Tierra en torno al Sol). Ambos planos se intersectan en una recta llamada *línea de los nodos*. Los eclipses tienen lugar cuando la Luna está próxima a dicha línea. Si ambos planos no formaran un ángulo, los eclipses serían mucho más frecuentes. Por ese motivo no hay un eclipse de Luna y uno de Sol cada mes, cuando hay luna llena o luna nueva.

FIG. 1



Los eclipses de Luna suceden cuando esta cruza el cono de sombra de la Tierra. Entonces, la Tierra está situada entre el Sol y la Luna.

FIG. 2



Los eclipses de Sol tienen lugar cuando la Luna está situada entre el Sol y la Tierra.

Zonas de umbra y penumbra y tipos de eclipses

En todo eclipse existe una zona de *umbra* y otra de *penumbra*. Umbra significa oscuridad total, mientras que la penumbra es la sombra parcial que hay entre los espacios enteramente oscuros y los enteramente iluminados que se generan durante los eclipses.

Como consecuencia de dichas zonas, se pueden clasificar los diferentes tipos de eclipses. Concretamente, existen tres clases de eclipse solar:

— **Parcial:** la Luna no cubre por completo el disco solar. Su duración puede superar las cuatro horas.

— Total: desde una franja (*banda de totalidad*) en la superficie de la Tierra, la Luna cubre totalmente el Sol. Fuera de la banda de totalidad el eclipse será parcial. Será un eclipse total para los observadores situados en la Tierra que se encuentren dentro del cono de sombra lunar, cuyo diámetro máximo sobre la superficie de nuestro planeta no superará los 270 km. La duración de la fase de totalidad puede alcanzar varios minutos, entre 2 y 7,5, abarcando todo el fenómeno algo más de dos horas.

— Anular: ocurre cuando la Luna se encuentra cerca del *apogeo* (el punto más alejado de la Tierra) y su diámetro angular es menor que el solar, de manera que en la fase máxima permanece visible un anillo del disco del Sol. Fuera de esta posición, el eclipse es parcial. En los eclipses anulares la duración máxima alcanza los 12 minutos.

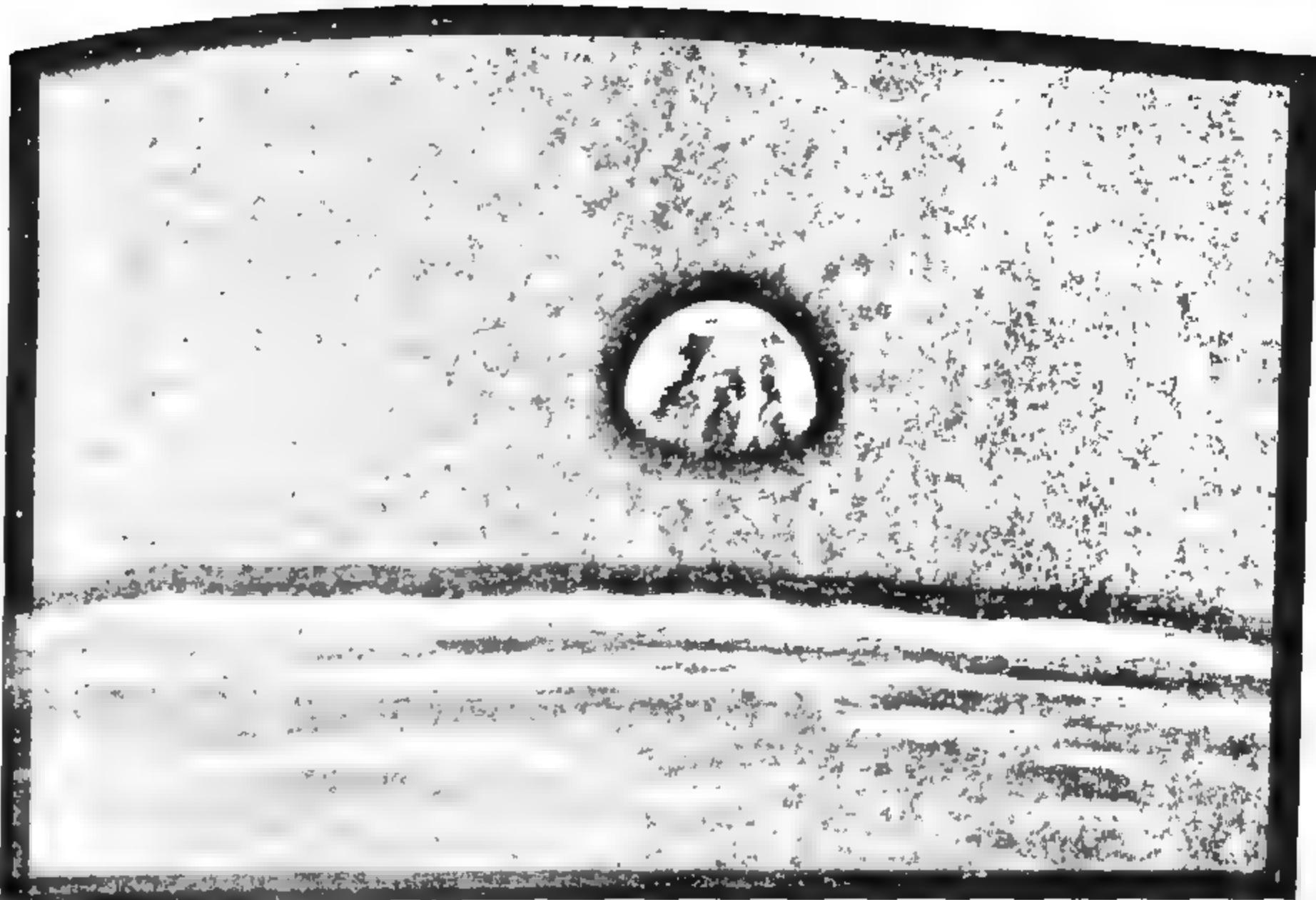
Por su parte, existen dos tipos de eclipse lunar:

- Parcial: la sombra del cono terrestre no cubre por completo el disco lunar.
- Total: la sombra del cono terrestre cubre por completo el disco de la Luna. La duración de la fase de totalidad puede ser de 1,5 a 3,5 horas.

Los eclipses solares, como se ha indicado ya, son difíciles de observar cuando ocurren y de estudiar después de que hayan sucedido. Por ese motivo incluimos en las páginas siguientes un mapa con la distribución de ellos a lo largo de algunas décadas.

Además de los totales y anulares existe otro tipo de eclipse que es realmente muy infrecuente: los eclipses híbridos. Este fenómeno es muy especial y corresponde a una combinación de eclipse total y anular. Desde algunas regiones de la Tierra adopta la apariencia de un eclipse anular, mientras que en otras aparecerá como uno total.

Como se ha dicho, el plano orbital de la Luna está inclinado cinco grados respecto al plano orbital terrestre. Sin esta inclinación se tendría un eclipse lunar cada mes, durante cada luna



Arriba, la Tierra vista desde cerca de la superficie de la Luna. Abajo, foto tomada desde el espacio durante un eclipse de Sol de 2006 que muestra la sombra proyectada por la Luna sobre parte de Chipre y de Turquía.



llena. Pero en la mayoría de los casos la Luna pasa un poco antes o después y no hay eclipse. En cambio, cuando la Luna está suficientemente cerca de la línea de corte sí se produce, lo cual sucede normalmente dos veces al año. Teniendo en cuenta la probabilidad de que ello suceda por la noche en el lugar donde

vivimos, se puede ver en promedio un eclipse lunar cada año, mientras que los eclipses de Sol son mucho más raros. Al mismo tiempo, se hizo evidente que las fechas de los eclipses mostraban un ciclo repetitivo de 19 años. Este fue el origen del ciclo de saros. Es sorprendente que este ciclo ya fuera conocido en la Edad de Piedra

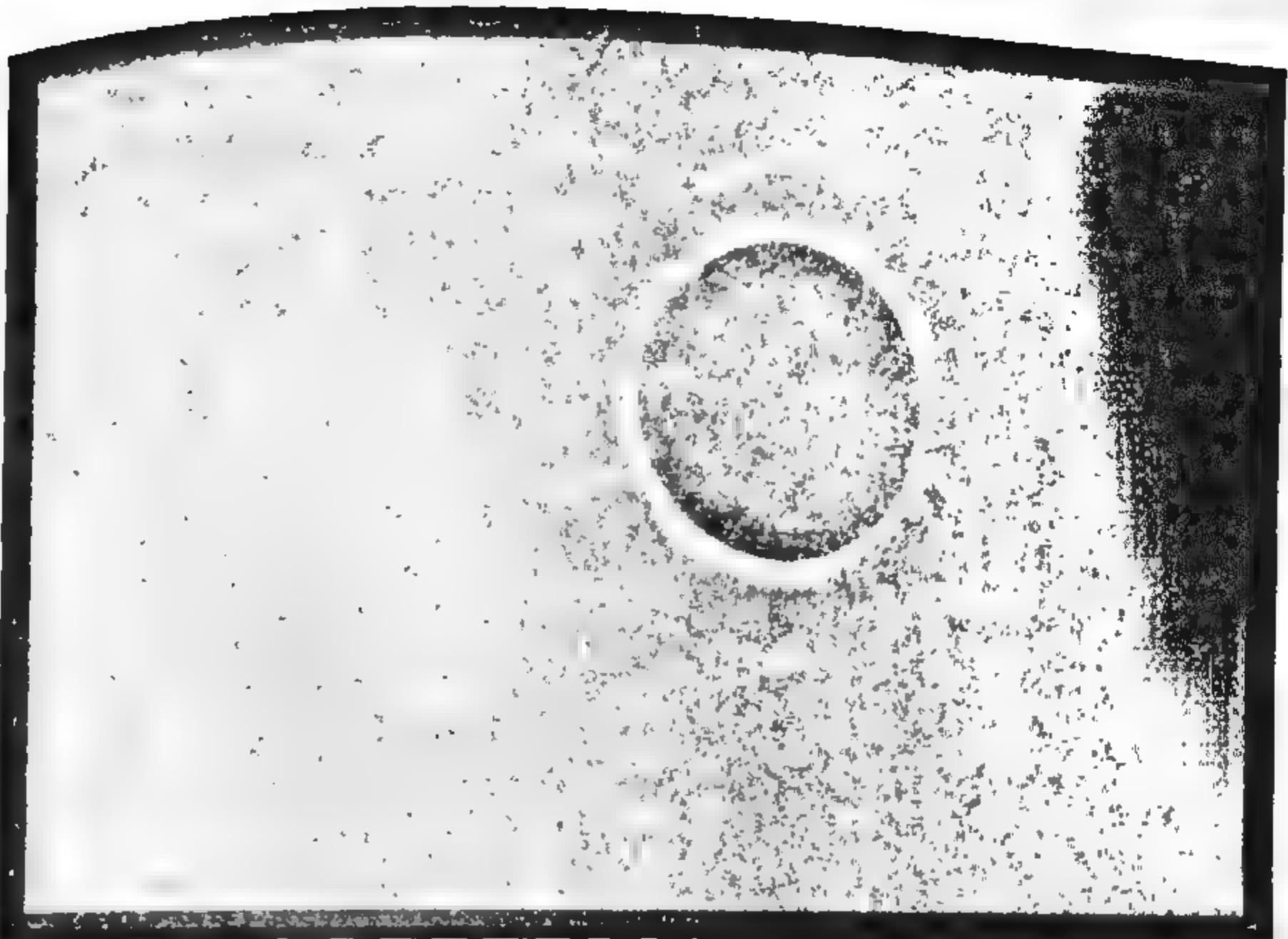
La tierra entera con sus aguas circundantes debe tener esa forma que su sombra revela, ya que esta eclipsa la Luna con el arco de un círculo perfecto.

NICOLÁS COPÉRNICO

Por ejemplo, las ruinas de Stonehenge, en Inglaterra, tienen un anillo de 56 agujeros que están datados, en su parte más antigua, en el 1900 a.C. Con los datos modernos, $3 \cdot 18,61 = 55,83$ años, una mera desviación de 1 día/año, lo cual realmente es extraordinario para un calendario de aquellos tiempos. Existe una cita de Diodoro de Sicilia, historiador romano de la época de César, que menciona: «Dicen los hiperbóreos que su dios vuelve cada 56 años para visitar las islas [Británicas], cuando las estrellas van a sus posiciones de partida». Sin duda es una referencia escrita al ciclo de saros que, recordemos, ya era conocido por los babilonios.

APORTACIÓN DE LOS ECLIPSES AL DESARROLLO CIENTÍFICO

Como vimos, los eclipses fueron el decisivo soporte del primer modelo heliocéntrico propuesto por Aristarco. A partir de la observación, Aristarco dedujo que el Sol tenía un diámetro cinco veces mayor que la Tierra y argumentó que carecía de sentido que el cuerpo grande girara en torno al pequeño, lo que le condujo a un planteamiento heliocéntrico. Hoy, con las leyes de Newton, esta deducción se entiende muy bien. Aristarco, en cambio, lo vio necesario por intuición. Su modelo heliocéntrico



Arriba, eclipse total de Sol de agosto de 2017, visto desde un avión. Abajo, eclipse de Sol anular.

era correcto, aunque cometió un error de factor 20 para la distancia al Sol y su diámetro, el cual es en realidad 109 veces mayor que el de la Tierra. Pero incluso Copérnico se refirió a las ideas de Aristarco cuando propuso su sistema. De nuevo se comprueba que todo parte de un inteligente análisis de la observación de los eclipses.

Otro campo donde los eclipses sirvieron de ayuda fue el de la determinación de la longitud de un lugar. La posición geográfica relativa a la latitud se puede deducir de diversas formas. Pero las posiciones relativas a las longitudes y, en consecuencia, las distancias en este ámbito fueron un serio problema para la humanidad durante siglos. De hecho, fue un eclipse lunar observado por Alejandro Magno en la India lo que ayudó accidentalmente a resolverlo. Cuando su expedición regresó a Grecia, la gente les dijo que el mismo eclipse había sido observado allí unas horas antes de la noche, experimentándose así por primera vez las zonas de tiempo sobre el globo: dado que la puesta del Sol en Grecia ocurre algunas horas después que en la India, se hizo evidente a cuántos grados estaba localizada esta, hacia el este, respecto a Grecia, permitiendo deducir la distancia a la India en unidades de longitud.

El problema de la determinación de la longitud y de las distancias este/oeste se mantuvo como un tema desafiant durante siglos. Se había descubierto América, pero no se sabía cómo medir la distancia a México. Habría sido fácil resolverlo usando relojes sincrónicos, pero estos no estaban disponibles. El reloj de péndulo había sido inventado por Huygens, pero ¿cómo llevar uno de estos relojes en un barco? ¿Cómo podía ser sincrónico un reloj «tratado bastante mal» durante días en un barco, con uno situado en casa? Era imposible. De nuevo, un eclipse ayudó a solucionar el problema: en este caso, los eclipses de las lunas de Júpiter detectadas por Galileo. Él mismo propuso usar dichos eclipses como fenómenos que pudieran ser observados de forma simultánea en muchos países. El instante en que una luna desaparecía de repente al entrar en la sombra de Júpiter podía ser «leído» a la vez en Europa y México, y la determinación de la hora que permitía este método tenía la precisión de un minuto.

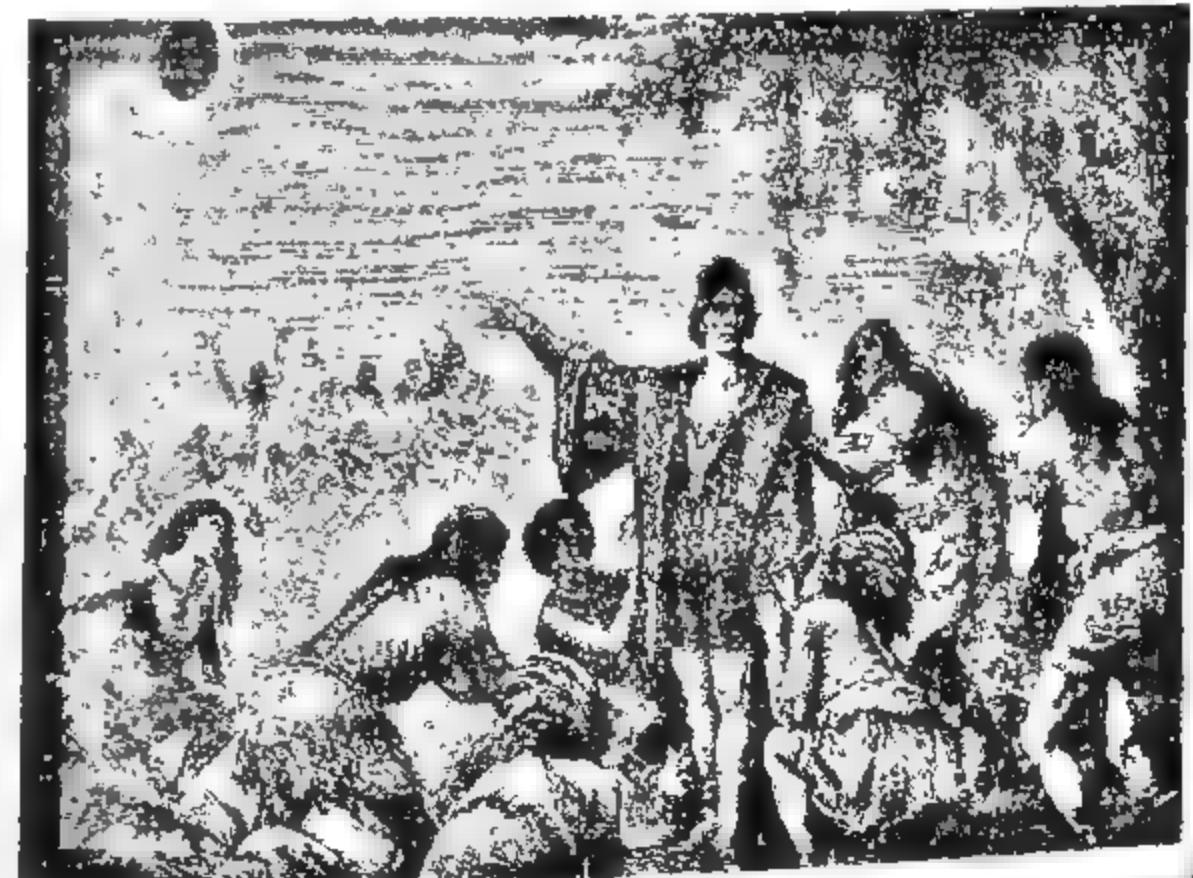
ALGUNAS CURIOSIDADES DE LOS ECLIPSES

Al volverse sistemáticas las observaciones, predecir los eclipses lunares dejó de ser tan complicado, pero los eclipses totales de Sol resultaron más difíciles de estudiar. Un eclipse total de Sol es un evento local que ocurre muy raramente en el lugar donde se vive. Esta dificultad, unida al fanatismo sobre la trascendencia de los eclipses, provocó situaciones tan absurdas como trágicas. Por ejemplo, dos astrónomos chinos fueron condenados a muerte por fallar en la predicción de un eclipse solar; en cambio, Tales, el filósofo griego, fue afortunado al predecir un eclipse solar visible desde Grecia. Este coincidió con la batalla entre los persas y los medos del 585 a.C., en el área donde está hoy Turquía. Tal «intervención divina» motivó un armisticio y Tales se convirtió en un hombre de gran reputación.

Fingir poderes mágicos gracias a un eclipse

En el cuarto y último viaje de Colón a América, el 25 de junio de 1503 llegó con las dos carabelas que le restaban a la playa de Santa Gloria, en Jamaica. Dado que el estado de las carabelas era irreparable ordenó la construcción de un fortín con los restos de los navíos. Mediante un sistema de trueques con los nativos conseguían provisiones para sobrevivir. La situación era difícil, no llegaba ayuda y los nativos se negaron a realizar más trueques. Colón llevaba consigo el *Almanach Perpetuum*, y por él sabía que el 29 de febrero de 1504 se produciría un eclipse total de Luna. Predicción astronómica de la que supo sacar provecho. Tal como se narra en el cuaderno de bitácora, centenares de indígenas se reunieron en la tarde predicha. Al salir la Luna, ya estaba oscurecida parcialmente, y el pánico no dejó de aumentar entre los nativos mientras la veían menguar. Suplicaron a Colón que hiciera reaparecer a la Luna y él les exigió a cambio que reanudasen su entrega de suministros. Evidentemente los nativos no se asustaron por el eclipse lunar; es seguro que ya habían visto otros. Lo que les debió sorprender mucho es que ocurriera cuando Colón lo dispuso. Debieron pensar que era magia del hombre blanco y quedaron muy impresionados.

Recreación artística del eclipse presenciado por nativos de Jamaica, quienes creyeron que había ocurrido como consecuencia de no haber satisfecho las peticiones de Cristóbal Colón.



Fue Cassini en el Observatorio de París quien inició un proyecto para poder leer este tiempo global. Pero al calibrar los datos resultantes de la observación surgieron algunas dificultades. El tiempo transcurrido entre dos eclipses era inestable. Roemer, un joven danés de su equipo, se propuso entender esta inestabilidad como resultado del tiempo que

Hemos hallado una huella extraña en las ondas de lo desconocido.

ARTHUR EDDINGTON

la luz necesita para propagarse hasta alcanzar la Tierra en distintas posiciones. Como consecuencia de ello se dedujo un método para medir la velocidad de la luz.

Ya en el siglo XX, se empleó un eclipse de Sol para promover un paso fundamental en la física moderna. Albert Einstein predijo que la luz sería desviada por la atracción gravitatoria de las masas, y este fenómeno se verificó durante el eclipse de Sol de 1919. Arthur Eddington, tras estudiar minuciosamente los datos de observación, anunció que la nueva teoría de Einstein coincidía con sus resultados observacionales. Eddington había obtenido un valor ($1.98 \pm 0.16''$) en concordancia con la predicción teórica de Einstein.

Otro tipo de «eclipse» permitió comprobar la teoría de Einstein con mayor precisión. La occultación de un quásar (objetos lejanos que emiten grandes cantidades de energía y son muy luminosos) por el Sol posibilitó medir la desviación de este en 1987 mediante técnicas de interferometría, otorgando una verificación de la teoría con un error de solo el 0,1%.

Tomando el término eclipse en el sentido más general de «ocultación», se puede considerar que en la actualidad los eclipses vuelven a estar en una situación puntera en la investigación científica. Una forma de detectar la materia en el universo, en particular las *enanas marrones*, de brillo demasiado débil para que su propia luz permita detectarlas, la tenemos en el efecto de «microlente» que tiene lugar cuando una de ellas es occultada por otra estrella. La luz de la estrella enana es desviada y focalizada a lo largo del eje óptico de la *lente gravitatoria*, presentando por un corto intervalo de tiempo un brillo realzado que permite detectarla. En este mismo ámbito, las enormes masas constituidas

por las galaxias individuales y los cúmulos de galaxias desvían la luz de otros objetos situados a gran distancia. Desde 1979 en que fue detectada la primera lente gravitatoria, este se ha convertido en un gran tema de la astronomía actual. En 1912, Einstein había predicho este efecto en alguna de sus notas, pero no lo publicó por creerlo de poca importancia. No fue hasta que un amigo le habló de ello una y otra vez que en 1936 lo publicó con la intención de «hacer feliz a ese pobre chico». En la actualidad es uno de los campos de investigación en astronomía y uno de los métodos utilizados para detectar planetas extrasolares.

EL PROBLEMA DE LA LONGITUD Y LA AYUDA DE LOS ECLIPSES

A diferencia de la latitud, la longitud fue, durante siglos, un auténtico problema para los navegantes y cartógrafos. Llegó a ser tan arduo que diversos países ofrecieron premios y remuneraciones a quien fuera capaz de resolver la obtención de longitudes geográficas. Determinar la longitud era vital tanto en navegación marítima como en la exploración de territorios.

Para intentar conocer la longitud, los primeros hombres de mar tenían que basarse en la navegación por estimación, que en viajes largos era muy peligrosa y dio lugar a que se perdieran muchos barcos y muchas vidas. A fin de evitar problemas, cuando era posible los navegantes aprovechaban sus conocimientos relativos a la latitud y seguían una línea de latitud constante, corrigiendo el rumbo cuando estaban ya próximos a su destino. Este procedimiento fue el utilizado por Colón en su primer viaje. Este método impedía seguir la ruta más directa o aprovechar los vientos y las corrientes más favorables, alargando el viaje y aumentando los riesgos de naufragio.

A raíz de una serie de catástrofes marítimas debidas a errores graves en el cálculo de la posición en el mar, en 1567 el rey Felipe II de España ofreció un premio por el descubrimiento de una solución al problema de la longitud y en 1568 su hijo Felipe III aumentó su cuantía, ofreciendo una recompensa de 6000 ducados de renta perpetua, 2000 de renta vitalicia y otros 1000

de costas, a quien lo resolviese. Países Bajos se sumó al esfuerzo con un premio ofrecido en 1636. Reino Unido estableció la Junta de Longitud en 1714, dando premios para resolver el problema: el Parlamento británico prometió, en el famoso Decreto de la Longitud de 1714, 20 000 libras para una solución que permitiera calcular la longitud de una manera precisa. Por su parte, el rey de Francia Luis XIV fundó la Academia de Ciencias en 1666 para el avance del saber científico en navegación y la mejora de mapas y cartas de navegación. Desde 1715, la Academia ofreció un premio específicamente para ello. Científicos de la mayoría de países europeos estaban al corriente del problema y participaron en la búsqueda de una solución, que representó uno de los mayores esfuerzos científicos de la historia. Los premios debían ser concedidos por el descubrimiento y la demostración de un método práctico para determinar la longitud de un barco en el mar.

El procedimiento astronómico para calcular la longitud de un lugar determinado, en un principio, consistía en «tener la suerte» de observar un fenómeno astronómico visible desde distintos puntos de la superficie terrestre. Si se sabía a qué hora sucedía en el puerto de referencia o de salida, y la diferencia horaria entre este lugar y el punto del que se deseaba conocer la longitud, se podía determinar esta en horas o su equivalente en grados (ya que 24 horas corresponden a 360° y por lo tanto era muy sencillo hacer la conversión).

Los recursos para aplicar este método fueron varios:

- El primer fenómeno que se utilizó fue el de los eclipses lunares. Como los anuarios astronómicos daban la hora en que se producía el eclipse en otro lugar cuya longitud era conocida, era posible calcular la longitud de aquel desde donde se estaba observando. El problema es que no se producen eclipses de Luna todos los días; por lo tanto, este método era poco útil. En todo caso, el eclipse de Luna del 29 de febrero de 1504 fue utilizado por Cristóbal Colón para determinar la longitud de los nuevos territorios.
- Otros fenómenos utilizados, y que se repetían con más asiduidad que los eclipses, eran las ocultaciones de estre

llas por la Luna (realmente constituyen también pequeños eclipses). Sabiendo a qué hora la Luna ocultaba ciertas estrellas en el meridiano de referencia, y conocida la hora de esta misma ocultación en el punto de observación, se podía deducir la longitud por la diferencia de tiempo. Esta propuesta de Halley hacia 1683 tenía sin embargo varios inconvenientes. El principal era que el movimiento de la Luna es muy complicado, lo cual introducía muchas dificultades a la hora de establecer los cálculos de forma rigurosa. Pero además hay pocas estrellas brillantes ocultadas por la Luna, y documentar las posiciones de las estrellas débiles y conseguir que los navegantes las reconocieran resultó un fracaso, aunque el trabajo de Halley fue útil para el método de distancias lunares que se utilizó con posterioridad.

- Galileo Galilei, en 1612, después de determinar los períodos orbitales de los satélites de Júpiter, propuso medir la longitud a partir de las observaciones de sus eclipses. Preparó unas tablas que indicaban el día y la hora de desaparición de cada satélite en el meridiano de referencia, de modo que al observar este fenómeno en otro punto de la Tierra a otra hora era posible saber la diferencia horaria entre estos dos puntos y, por tanto, la diferencia de longitudes. El problema de este método era que en un barco resultaba imposible poder realizar las observaciones por los movimientos propios de la nave. Así que solo se pudo utilizar en tierra firme, donde fue muy empleado por los cartógrafos de diferentes países europeos a partir de 1650.
- Finalmente, con los avances científicos y tecnológicos se pudieron realizar observaciones astronómicas de mayor precisión y en 1755 Mayer propuso el *método de las distancias lunares*. Tal procedimiento permite la determinación de la longitud al observar simultáneamente el ángulo entre la Luna y una estrella de referencia o el Sol y la altura de ambos sobre el horizonte. Tras la corrección de las mediciones y el uso de las tablas se obtenía la hora en el meridiano de referencia. El problema era el uso de la trigonometría esférica, que hacía tedioso y complejo el método

y que además exigía una cierta formación matemática para no cometer errores.

La solución definitiva a todo ello no sería astronómica, sino que vino de la mano de un relojero, John Harrison, en el siglo XVIII.

En 1656, Christiaan Huygens ya había desarrollado relojes de péndulo que permitían determinar con precisión la longitud en tierra. Pero en aquella época no había relojes capaces de mantener la hora exacta en un navío en movimiento. Los relojes de péndulo se atrasaban, se adelantaban o se paraban, debido al movimiento del barco, sin contar que además se estropeaban por los cambios de temperatura o presión, afectándoles también la salinidad. Este problema tecnológico fue resuelto en 1760 por John Harrison, un carpintero de Yorkshire, que acabó especializándose en el diseño y construcción de relojes de precisión.

A lo largo de más de 30 años, Harrison construyó cinco cronómetros, dos de los cuales fueron probados en el mar. Su primer modelo, el H-1 (un artefacto que, colocado en el interior de una caja acristalada de 122 cm de lado, pesaba 34 kilos), no fue probado en las condiciones requeridas por la Junta de Longitud. En cambio, realizó pruebas con el Almirantazgo en un viaje de ida y vuelta a Lisboa. El reloj se comportó de manera excelente, pero el perfeccionismo de Harrison le impidió enviarlo a la prueba obligatoria en un viaje hasta las Indias Occidentales. Harrison lo presentó a la Royal Society, que convocó al Consejo para examinarlo. Ante este, Harrison debía exigir un viaje a las Indias para demostrar que merecía el premio, pero se limitó a resaltar los «puntos débiles» del H-1. De hecho, fue el único que criticó el reloj marino.

En su lugar, solicitó 500 libras esterlinas para poder construir un segundo reloj más pequeño, ligero y más perfecto, el H-2. Cuando lo terminó repitió la misma actitud ante el Consejo: pidió más dinero para continuar trabajando, al no considerar al H-2 adecuado para un largo viaje, si bien la Royal Society lo puso a prueba con un resultado también excelente. Harrison trabajó durante 19 largos años y en 1757 finalizó el H-3, un reloj que por primera vez no criticó. Pesaba poco más de 20 kilos. Pero no

satisfizo todavía con su trabajo, dos años más tarde acabó el reloj que al fin obtuvo el premio de la longitud, el H-4. Era un reloj totalmente diferente a los anteriores, ya que era de bolsillo; aunque algo grande (con un diámetro de 127 mm) resultaba diminuto comparado con sus hermanos y solo pesaba 1,3 kg. En el verano de 1760 fue presentado al Consejo, para ser embarcado en un viaje que supuso una travesía del Atlántico de 81 días durante la que solamente se atrasó 5 segundos. A pesar de ello, los astrónomos del Consejo, partidarios de una solución astronómica, forzaron un informe final en 1762 explicando que los experimentos realizados no habían sido suficientes y Harrison solo recibió 1500 libras como mero reconocimiento a su trabajo.

Tras nuevas pruebas con resultado satisfactorio, en el otoño de 1764 el Consejo decidió entregarle 10000 libras (la mitad del premio) a condición de que entregase todos los relojes y secretos de construcción del H-4. Además, para conseguir el resto del premio Harrison debía supervisar la construcción de dos copias del H-4. Este tenía una autonomía de 30 horas y las variaciones de temperatura prácticamente no lo alteraban.

Con su mitad del premio Harrison comenzó la construcción del H-5, que duró tres años. Entonces solicitó ayuda al rey Jorge III, quien puso fin a tanto desatino, ordenando realizar las pruebas de precisión para el H-5 en el propio palacio. Después de diez semanas de observaciones diarias el cronómetro mostró un error de solo un tercio de segundo al día. El rey urgió al Parlamento a que entregara el premio completo a Harrison después de amenazar con ir a la propia cámara. Por fin, Harrison recibió otras 8750 libras del Consejo, en 1773, pero no obtuvo nunca el premio oficial, que no se otorgó a nadie. Aunque el Parlamento británico acabó por recompensarle por su cronómetro marino, su uso tardó mucho en generalizarse por ser caro y difícil de conseguir.

Mientras tanto, un marino podía adquirir un buen sextante y las tablas de la distancia lunar por unas 20 libras. Finalmente, sin embargo, se hizo necesario construir relojes marinos, no solo fiables y exactos, sino también asequibles para cualquier capitán de buque mercante. Gracias a la gran producción de cronóme-

tos del también relojero británico John Arnold, el censo de estos pasó de uno en 1737 hasta los cinco mil en 1815.

A principios del siglo XIX los cronómetros marinos asequibles y fiables estaban ya disponibles y fueron reemplazando los antiguos métodos. Se podía comprar un par de cronómetros relativamente baratos, sirviendo uno de control del otro, en lugar de adquirir un simple y más caro sextante de calidad para la navegación por el método lunar. A mediados del siglo XIX, la gran mayoría de navegantes de todo el mundo había dejado de utilizar el método de las distancias lunares.

Para conocer la longitud, solamente era necesario efectuar los siguientes pasos:

- Poner el cronómetro a las 12 cuando el Sol pasaba por el meridiano local del puerto de partida o referencia.
- Para determinar la longitud del punto deseado, había que saber a qué hora pasaba el Sol al mediodía por ese punto y comparar dicha hora con la del meridiano de referencia.
- Esa diferencia de horas y minutos daba la diferencia de longitud, y por la equivalencia $24\text{ h} = 360^\circ$, se podía establecer en grados.

Los marinos modernos tienen varias opciones para determinar la información exacta de su posición. En particular, disponen del *Sistema de Posicionamiento Global*, conocido comúnmente como GPS, un método de navegación por satélite que de alguna forma nos ha devuelto a los cielos para poder guiarnos por el océano como en el pasado.

De la astronomía a los calendarios

La evolución de los calendarios a lo largo de la historia de la humanidad denota el constante deseo de mejora y de aumento de la precisión en la determinación de la época del año. De ello dependerían múltiples aspectos de la vida cotidiana.

En la Antigüedad, la astronomía servía para ayudar a establecer las fechas de siembra y cosecha, así como para celebrar los ritos religiosos. De esta forma, desde las diversas culturas nacerían distintos tipos de calendarios relacionados en general con el movimiento solar y lunar. El que usamos en la actualidad tiene también lejanos orígenes. Su camino hasta él ha sido difícil, por lo que vale la pena echar un vistazo a su historia.

Antes, sin embargo, es necesario recordar un par de conceptos astronómicos importantes: el año trópico y el año sidéreo. El primero es el tiempo necesario para que el Sol pase dos veces consecutivas por el punto Aries (el punto de intersección entre la eclíptica y el ecuador celeste), que marca el equinoccio de primavera, y su duración es de 365,242189 días de tiempo solar medio. En cuanto al año sidéreo, es el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de la Tierra por un mismo punto de su órbita, tomando como referencia unas estrellas lejanas, y su duración es de 365,256363 días de tiempo solar medio (o días solares medios). En ambos casos vemos que la duración del año es aproximadamente de 365,25 días, siendo este cuarto de día de más, más allá de los 365, que nosotros resolvemos con

los años *bisiestos*, lo que ocasionó problemas a los diferentes calendarios.

Remontándonos hasta los antiguos egipcios, las observaciones astronómicas les llevaron a controlar mejor la crecida anual del Nilo. Ya en el siglo v a.C. Heródoto reconoció que «su calendario es en mi opinión mejor que el de los griegos, porque [...] el ciclo de las estaciones siempre aparece en la misma época para ellos».

Las lecciones de historia sugieren que las civilizaciones se mueven en ciclos. Podemos remontarnos a los babilonios, los sumerios, los egipcios, los romanos, los chinos. Como entonces, estamos obviamente en un ciclo muy ascendente y espero que siga así. O puede que no.

ELON MUSK

horas y se iniciaba a medianoche. La salida heliaca de Sirio al amanecer por el horizonte marcaba (en el Imperio Medio) el inicio de la crecida del Nilo y el comienzo del calendario. Antes de este calendario solar se sabe que se usaron diversos calendarios locales lunares, estelares o luni-estelares en diferentes regiones. Pero fue el calendario civil antes citado el que se extendió por todo el territorio. Como las crecidas del Nilo marcaban la vida en todo Egipto, se dividía el año en tres estaciones: Inundación, Resurgir y Sequía.

Possiblemente, el calendario civil se usó en Egipto desde el Imperio Antiguo hasta la conquista por Alejandro Magno, aunque para algunos festivales religiosos se usaban cálculos realizados con los calendarios lunares locales, de la misma manera que en la actualidad se usa el calendario gregoriano pero se calcula la fecha de Pascua según la Luna (como se hacía en el calendario judío original).

Como el calendario civil egipcio no consideraba años bisiestos, el cuarto de día de más que prácticamente corresponde al año trópico implicaba que la primera aparición de la estrella Sirio sobre el horizonte se atrasara un día cada cuatro años, y que al cabo de 1460 años esta se hubiera atrasado un año completo

respecto a las estaciones. Una consecuencia de ese desfase era que las fiestas se desplazaban fuera de su estación: por ejemplo, una fiesta de verano se celebraría en invierno transcurridos 730 años. En el año 238 a.C. se reunieron en Canope los sacerdotes-sabios y otros líderes religiosos para reformar el calendario. Según sus cálculos, concluyeron que un año duraba 365 días más 6 horas adicionales. La solución al desfase fue añadir un día más cada cuatro años, después de los «*epagómenos*», de manera que ese cuarto año tendría 366 días, pero la oposición del clero de las diferentes regiones hizo fracasar dicha reforma.

Con la conquista romana, el calendario civil egipcio se conservó casi idéntico, pero con un día adicional cada cuatro años. En el año 46 a.C., Julio César adaptó este calendario egipcio y es el que estuvo en vigor en Europa hasta la reforma del papa Gregorio XIII, en 1582.

Los astrónomos en la Edad Media usaron este calendario egipcio debido a su regularidad matemática. Copérnico, por ejemplo, construyó sus tablas para el movimiento de los planetas basándose en la medición del tiempo con el año egipcio.

EL CALENDARIO ROMANO

Según la tradición, el origen del primer calendario romano procede del primer rey de Roma, Rómulo. Pero se sabe que diferentes pueblos romanos primitivos tenían calendarios lunares, cada uno con un número de meses y días diferentes, y cuya duración del año también difería. El calendario de Rómulo tenía 10 meses lunares, totalizando 304 días, desde marzo a diciembre. Entre diciembre y el comienzo del año siguiente había un periodo que no se estructuraba como mes, ya que no se efectuaban actividades agrícolas ni militares. Esta especie de «tiempo muerto» se dedicaba a ritos de purificación entre los dos años.

Los nombres de los meses del calendario de Rómulo eran:

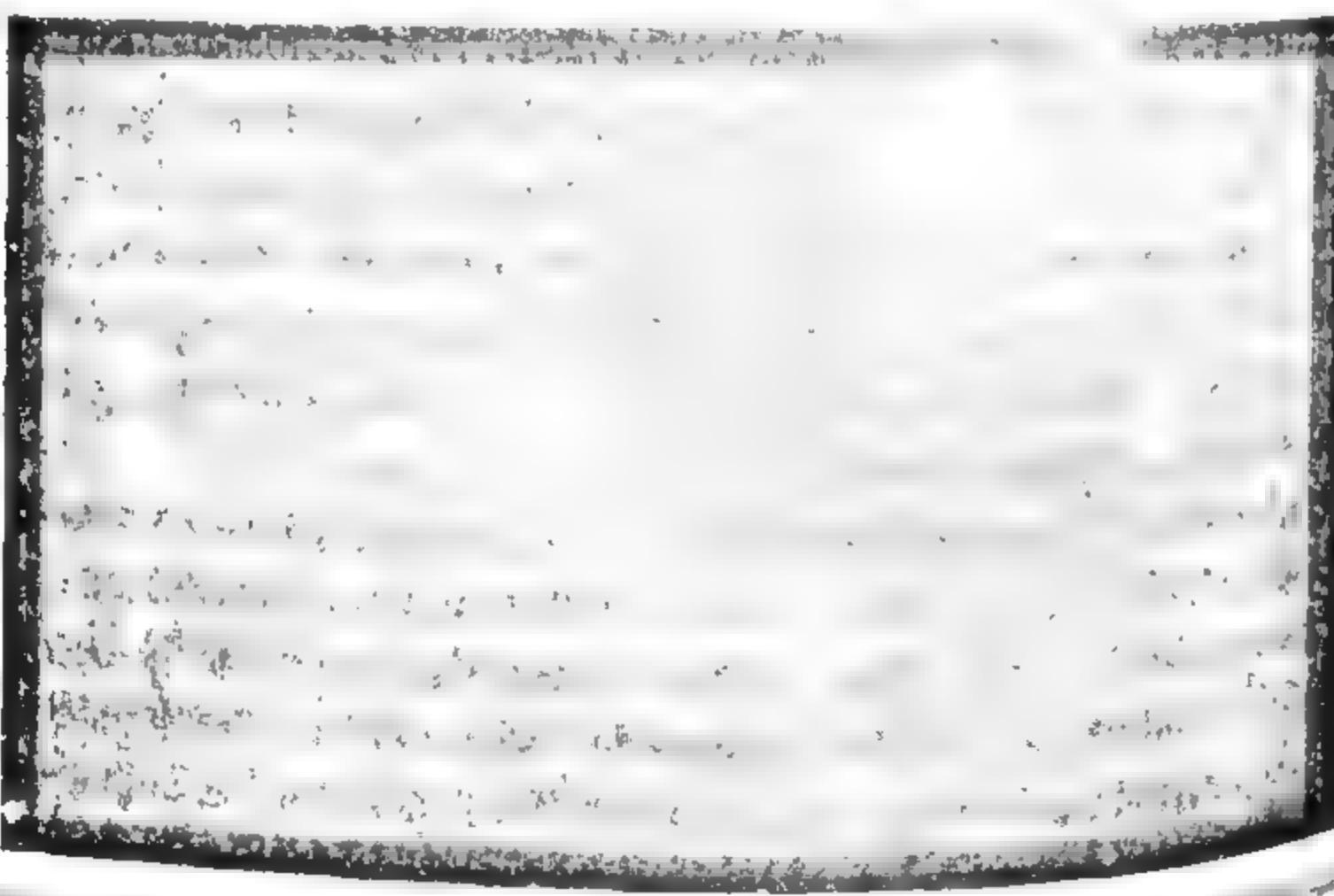
— *Martius* (31 días): en honor a Marte, padre de los fundadores de Roma, Rómulo y Remo. Marte era el dios de la

SALIDAS HÉLÍACAS DE ESTRELLAS Y EL INTI RAYMI

Los egipcios iniciaban su calendario en la salida heliaca de Sirio e idearon un método para contar el tiempo por la noche basado en las salidas heliáticas de 36 estrellas («estrellas decanas», ya que habían seleccionado una para cada segmento de 10° de los 360° del zodíaco). Los sumerios, babilonios y griegos también usaban las salidas heliáticas de varias estrellas para coordinar las actividades agrícolas. Para los incas, la salida heliaca de las Pléyades señalaba el inicio del año inca y además, como esto sucedía unos 13 o 15 días antes del solsticio de invierno, anunciaría la fiesta del «Inti Raymi». Los incas establecían una relación entre el cúmulo de las Pléyades y el ciclo agrícola anual. A este cúmulo lo llamaban «Qollqa», que en quechua significa granero o depósito de alimentos. Las Pléyades no son visibles en el cielo nocturno del altiplano desde el 3 de mayo hasta el 9 de junio, esto es, durante 37 días, lo que coincide con el tiempo entre el final de la cosecha y la próxima siembra, tiempo que destinaban a la preparación de la misma.

Predicción climática

En la sierra andina solo se reconocen dos períodos: de lluvias y de secano. La observación detallada de las Pléyades servía para pronosticar la cantidad de precipitación y los cambios climáticos del período de lluvias. Se ha comprobado que durante los años normales los vientos predominantes van de este a oeste. Los vientos van hacia la costa, dando lugar a un equilibrio atmosférico y con ello a cielos limpios en junio y julio (cuando se observaban las Pléyades para hacer la predicción) y lluvias normales en octubre y noviembre. Pero en los años de clima anormal, las aguas del océano Pacífico son calentadas por las corrientes del fenómeno El Niño, lo que produce excesiva evaporación y calentamiento del aire, y la creación de círculos (franjas de nubosidades tenues y vaporosas que casi no se ven) que producen una visión borrosa y debilitada de las Pléyades. De aquí nacen las predicciones que hacían los incas.



Cúmulo estelar de las Pléyades.

guerra, y en este mes se iniciaban las campañas bélicas. Incluía el equinoccio de primavera.

- *Aprilis* (30 días): es un nombre de dudosa interpretación. Una teoría expresa que estaba consagrado a Venus, Apru en etrusco. Se dedicaba a la fertilidad.
- *Maius* (31 días): también su titularidad es discutida, ya que algunos afirman que estaba dedicado a la madre de Mercúrio, la diosa Maya, que se encargaba de la fertilidad agrícola. Otros atribuyen el mes a la veneración de los antepasados, los Maiores.
- *Iunius* (30 días): consagrado a Juno (Iuno), diosa protectora de las mujeres. Otra posible interpretación es que estuviera dedicado a los descendientes, los Iuniores.
- *Quintilis* (31 días): llamado así por ser el quinto mes (*quinque*: cinco).
- *Sextilis* (30 días): mes sexto (*six*: seis).
- *September* (30 días): mes séptimo (*septem*: siete).
- *October* (31 días): mes octavo (*octo*: ocho).
- *November* (30 días): mes noveno (*novem*: nueve).
- *December* (30 días): mes décimo (*decem*: diez).

También según la tradición, el segundo rey de Roma, Numa Pompilio (753 a.C.-674 a.C.), realizó una reforma. Los meses pasaron a durar 29 y 31 días alternativamente (los números pares se consideraba que traían mala suerte), y se añadieron dos meses entre diciembre y marzo: enero y febrero. Desde mediados del siglo II a.C., el año que comenzaba en marzo pasó a iniciarse en enero. Febrero tenía 28 días, marzo, mayo, julio y octubre 31 días y el resto 29 días; en consecuencia, el año tenía una duración de 355 días (en lugar de los 354 del ciclo lunar). Aun así el calendario seguía desfasado del ciclo solar y de las estaciones, por lo que se optó por añadir dos meses (*intercalares*) cada cuatro años, uno de 22 y otro de 23 días.

La denominación de los dos primeros meses era:

- *Ianuarius*: en honor al dios latino Ianus, a quien se pedía protección en los inicios de todas las actividades, y protec-

tor de puertas y entradas (se representaba con una llave y una vara). Para Numa Pompilio fue el comienzo del año, pero una vez expulsada su dinastía en el siglo IV a.C., marzo volvió a ser el primer mes hasta el siglo II a.C., cuando se aceptó enero como principio de año.

— *Februarius*: dedicado a Februus (más conocido por el nombre de Plutón, dios del infierno), se consagró este mes a las ceremonias de purificación, para que los difuntos no molestaran, y también se realizaban en este mes actividades para lavar las culpas y errores cometidos a lo largo del año que acababa, y así empezar el nuevo con buenos augurios.

Los romanos distinguían cuatro estaciones, denominadas: *ver* (primavera), *aestus* (verano), *autumnus* (otoño) e *hiems* (invierno).

Como consecuencia de su calendario, que era lunar en sus inicios, los romanos denominaban los días del mes destacando tres especiales:

- Las *calendas*, que correspondían al primer día de cada mes y que en un principio debían coincidir con la luna nueva. De esta palabra deriva calendario.
- Las *nonas*, que eran el día cinco de cada mes, excepto en marzo, mayo, julio y octubre, en los cuales eran el día siete.
- Los *idus*, que eran el día trece de cada mes, excepto en marzo, mayo, julio y octubre, cuando eran el día quince. Deben corresponderse con la luna llena.

Si se quería indicar el día anterior o posterior de las tres fechas mencionadas, se ponía el adverbio *pridie* o *postridie* seguido de la fecha. Si se trataba de cualquier otra fecha, se contaban los días que faltaban para llegar hasta el más próximo de las tres fechas fijas y se colocaba la expresión *ante diem*, seguida del número de días contado del nombre de la fecha fija con la que se relacionaba.

Cada ocho días había uno de descanso, era el día del mercado y se aprovechaba para resolver cuestiones oficiales o ir a las

termas, etcétera. Entre mercado y mercado los días se denominaban de la A a la H. Las vacaciones en las escuelas se llevaban a cabo del 1 de julio al 15 de octubre, y en dos períodos más cortos, uno en marzo, para celebrar las fiestas en honor de Minerva (diosa de la sabiduría), y el otro, en diciembre, las Saturnales, del 17 al 25.

El día estaba dividido en 24 horas. El tiempo era medido por relojes de sol, *solárium*, y también se usaban las *clepsidra* o relojes de agua. Estos últimos eran, a grandes rasgos, recipientes con un orificio diminuto por el que entraba o salía agua a un ritmo lento y constante. Una escala graduada permitía determinar a partir del nivel del agua el tiempo transcurrido desde su puesta en marcha.

EL CALENDARIO JULIANO

En tiempos de Julio César existía un desfase de tres meses entre el calendario civil romano y las estaciones, por lo que el dictador encargó al astrónomo griego Sosígenes que le asesorase sobre su reforma de dicho calendario. Este le propuso abandonar el calendario de origen lunar y adoptar uno basado en el año solar, de 365,25 días solares. El *mes lunar sinódico* es el periodo que transcurre entre dos mismas fases de la Luna y tiene una duración aproximada de 29,53 días, lo cual es difícil de cuadrar con el ciclo solar.

César decretó entonces que cada año tendría 365 días, añadiéndose un día extra cada cuatro años (año que más tarde acabaría llamándose bisiesto), en el mes de febrero. Para compensar el desfase acumulado, se decretó que el año 46 a.C. tendría 445 días.

En honor a Julio César, se cambió el nombre de un mes. *Quintilis* (de 31 días) pasó a llamarse *Iulius*, julio (precisamente el mes en que él había nacido). También se introdujo otro cambio de nombre del mes como homenaje a César Augusto (63 a.C.-14 d.C.), el primer emperador romano y el que ocupó este puesto durante más tiempo en la historia. Este murió el 19 de agosto, y

en su honor, el mes *Sextilis* pasó a llamarse *Augustus*, agosto. Aunque originariamente tenía 30 días, para no ser menos que julio se le añadió uno, quedando en 31 y modificándose después los meses siguientes para que siguieran alternativos (de 30, 31, etcétera).

Nosotros, hasta cierto punto, somos lo que somos porque heredamos ciertas cosas de griegos y romanos.

DONALD KAGAN

En resumen, el calendario juliano tiene 12 meses: *Ianuarius* (31 días), *Februarius* (28), *Martius* (31), *Aprilis* (30), *Maius* (31), *Iunius* (30), *Iulius* (31), *Augustus* (31), *September* (30), *October* (31), *November* (30) y *December* (31). Cada 4 años se añade un día extra al mes de febrero para corregir el desfase con el año solar trópico, llamado año bisiesto.

Este calendario que se instauró en el 46 a.C. se utiliza todavía hoy en día en algunas iglesias orientales. En la actualidad, en occidente se usa el calendario gregoriano, fruto de una modificación en 1582 fijada por el papa Gregorio XIII.

LAS SEMANAS

Las semanas no tenían la misma duración para todos los pueblos de la Antigüedad. Muchas culturas antiguas, como las centro-americanas, usaban semanas de cuatro días, posiblemente en honor a los cuatro puntos cardinales. Babilonios y egipcios de la misma época, durante varios siglos, dividieron sus meses en tres decenios de 10 días cada uno.

Antes de la reforma juliana, e incluso durante algún tiempo después, el calendario romano incluía ciclos repetitivos de letras —desde la A hasta la H— para representar su semana laborable de 8 días. Estos ciclos eran llamados *nundinae* y eran independientes de otras divisiones mensuales, como *calendae* (el primer día del mes lunar), *nonae* e *idus* (el día de la luna llena).

Pero, sin embargo, parece ser que fue la observación del cielo la que fijó la duración de nuestras semanas. Por una parte, los babilonios, que contaban el tiempo con los meses lunares,

organizaban los días del mes destinándolos a determinadas actividades. Estos días coincidían con las cuatro fases de la Luna (creciente, llena, menguante y nueva), así que dividían el mes en cuatro períodos de siete días.

Por otro lado, son siete los cuerpos celestes visibles a simple vista que se identifican fácilmente, al describir movimientos diferentes desplazándose entre las estrellas: el Sol, la Luna, Marte, Mercurio, Júpiter, Venus y Saturno. Y ciertamente sus nombres están relacionados con los de los días de la semana.

Los griegos llamaban a los días de la semana «los días de los dioses», pero fueron los romanos, con deidades equivalentes a las griegas, los que finalmente nos legaron los nombres que hoy reciben tanto los planetas como nuestros días de la semana. Lunes es el día de la Luna, martes el de Marte, miércoles el de Mercurio, jueves el de Júpiter, viernes el de Venus, sábado el de Saturno y domingo el del Sol. En este último día, la semejanza entre palabras no se aprecia, pero por ejemplo en el idioma inglés sí se ha preservado, ya que *Sunday*, la palabra inglesa para domingo, consta de *day* que significa día y de *Sun* que significa Sol. En cualquier caso, el orden de los días de la semana no se corresponde con ningún criterio acerca de las distancias a las que se encuentran estos cuerpos celestes respecto a nosotros.

Hay que remontarse a una antigua tradición egipcia para poder explicar el orden que actualmente ocupan los planetas en la semana. Los antiguos egipcios creían que cada hora del día era regida por el Sol, la Luna o alguno de los cinco planetas conocidos. Concretamente, pensaban que las horas del día estaban regidas por los distintos cuerpos ordenados de mayor a menor distancia a la Tierra. En aquella época suponían que el planeta más distante era Saturno, y que más cerca se hallaban Júpiter, luego Marte, el Sol, Venus y Mercurio, siendo la Luna la más próxima. Por lo tanto, la primera hora del día estaba regida por Saturno, la segunda por Júpiter y así sucesivamente. Después de estas siete horas, el orden en el que estos objetos debían ser adorados se repetía, comenzándose de nuevo con Saturno, etcétera. Además, el planeta que regía la primera hora de las 24

era el que le daba su nombre al día. Por ejemplo, comenzando por Saturno, que es el más alejado, las horas 1, 8, 15 y 22 del primer día estarían dedicadas a él, la 23 a Júpiter, la 24 a Marte y la primera hora del día siguiente al Sol. Así, repitiendo los períodos de siete, se deduce la sucesión de los días de la semana tal y como la conocemos.

Los soldados romanos que ocuparon Egipto se acostumbraron a la semana pagana de siete días y la introdujeron en su propio país, reemplazando la distribución de los días romanos. Augusto y sus sucesores permitieron esta práctica pero la hizo oficial el emperador Constantino en el año 321 después de Cristo.

No se sabe a partir de qué momento se generalizó el uso de semanas de siete días, pero en la antigua Arabia y en Siria llamaron a los días de la semana con los nombres de los mismos objetos del sistema solar que los egipcios y persas. Ellos consideraban que el séptimo día era el correspondiente a Saturno, por lo tanto, comenzaban la semana con el día dedicado al Sol. El orden de los días era el mismo que tenían los egipcios. Es interesante notar que los mismos objetos (y exactamente en la misma secuencia) se utilizaban en la antigua India y en el Tibet para dar nombres a los días. Los hebreos también adoptaron esta semana.

El *saturnis dies*, día de Saturno, fue sustituido por los cristianos por sábado, el *sabbatum*, del hebreo *sabbath*, que significa descanso. Para Israel es el último día de la semana. También, el *solis dies*, día del Sol, fue sustituido posteriormente por los cristianos por el domingo, del latín *dominicis dies*, día del Señor. En el 321, el emperador romano Constantino I el Grande decretó que el domingo fuera considerado como el último día de la semana.

En cuanto al origen del nombre del año bisiesto, esta expresión procede del latín. En el calendario juliano se intercalaba el día «extra» en el mes de febrero, entre el 23 y el 24. Así, el nombre de este día era *bis sextus dies ante calendas martii*, que significa «repítase el sexto día antes del primer día del mes de marzo». En el calendario gregoriano, este día «extra» se colocó al final del mes, el 29 de febrero, pero se mantuvo la nomenclatura

EL CALENDARIO GREGORIANO

La reforma gregoriana nació como una necesidad religiosa debida al desfase del calendario juliano respecto al equinoccio de primavera.

En el Concilio de Nicea se determinó que la Pascua debía conmemorarse el domingo siguiente a la primera luna llena después del equinoccio de primavera en el hemisferio norte (equinoccio de otoño en el sur). En aquel año 325 el equinoccio de primavera correspondió al 21 de marzo, pero con el paso del tiempo la fecha se había ido adelantando. Así pues, en el Concilio de Trento (1545-1563) se decidió resolver este problema, ya que debido al desfase entre el año trópico de 365,242189 días y el año juliano que instituyó un bisiesto cada cuatro años, año promedio de 365,25 días, se daba lugar a un adelanto de 11 minutos por año. Así por ejemplo, desde el 325 hasta el 1582, que es cuando se hizo la nueva reforma, el desfase ya era de 10 días y el equinoccio de primavera correspondía al 11 de marzo.

Sin la reforma, la Semana Santa se habría ido celebrando cada vez antes, y tras algunos años habría cambiado incluso de estación, pero según la Biblia, Jesucristo murió en el mes judío de Nisán, en primavera. Por ese motivo la Iglesia tuvo interés en modificar el calendario juliano.

Después del Concilio de Trento, el papa Gregorio XIII (1502-1585) creó la Comisión del Calendario, incluyendo a Cristóbal Clavio y Luis Lilio, matemáticos y astrónomos, con el objetivo de asimilar el año civil al año trópico calculado con las tablas alfonsinas de Alfonso X el Sabio. Fue Pedro Chacón, matemático español, quien redactó el *Compendium* que aceptó y apoyó la Comisión, aprobándose la reforma el 14 de septiembre de 1580, que el papa promulgó por medio de la bula *Inter gravissimas* (1582) para aplicarla en octubre de 1582.

En el fondo, la reforma se reducía a adaptar el año civil al año trópico, para lo cual había que cambiar la regla de añadir un año bisiesto cada cuatro años porque resultaba excesivo, como se había demostrado. La solución fue la siguiente: se exceptuarían como años bisiestos los que fueran múltiplos de 100, salvo los

años múltiplos de 400, que sí serían bisiestos. Resumiendo, el año tiene 365 días, pero serán bisiestos (es decir, tendrán 366 días) aquellos años cuyas dos últimas cifras sean divisibles por 4, exceptuando los múltiplos de 100 (1700, 1800, 1900..., que no serán bisiestos), menos aquellos que también sean divisibles por 400 (1600, 2000, 2400..., que serán bisiestos). El calendario gregoriano ajusta a 365,2425 días la duración del año, lo que deja una diferencia de 0,0003 días de error anual. Es decir, «adelanta», pero tan poco que harán falta algunos miles de años para que se note, y entonces ya se resolverá.

Intentar establecer una regla para corregir este error tan pequeño no tiene mucho sentido ya que se sabe que en tan largo periodo de tiempo la Tierra desacelerará su velocidad de rotación (como también el movimiento de traslación), existiendo además otras perturbaciones debidas a la Luna. Lo más práctico será que cuando la diferencia sea significativa, es decir, cuando llegue a ser de un día, se declare que el siguiente año bisiesto no lo sea. De todas maneras, quedan casi dos mil años de análisis y discusión antes de que se haga necesario este ajuste.

El calendario gregoriano, en resumidas cuentas, se ha convertido en el más definitivo de todos los calendarios que ha tenido la humanidad. Hoy en día, muchos de los criterios prácticos con los que nos organizamos el tiempo en nuestra vida cotidiana los marca esta serie de 12 meses y los días de cada uno: enero (31), febrero (28 o 29), marzo (31), abril (30), mayo (31), junio (30), julio (31), agosto (31), septiembre (30), octubre (31), noviembre (30) y diciembre (31).

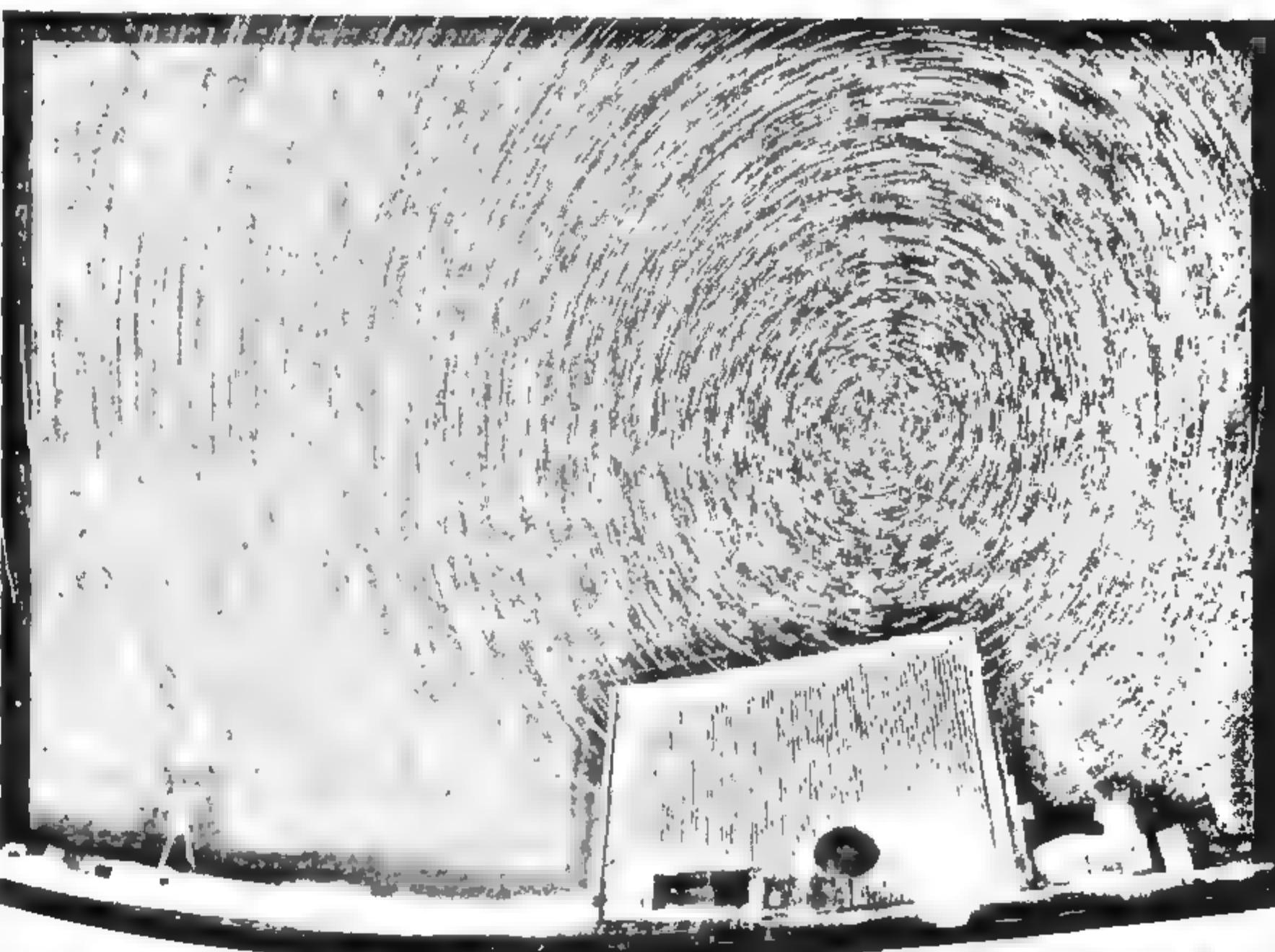
Para que sea más fácil recordarlo, hay reglas nemotécnicas, como esta que, en sus distintas versiones, nos recuerda que:

Treinta días trae noviembre,
junto con abril, junio y septiembre;
veintiocho solo febrero
y los demás, treinta y uno.

El calendario gregoriano, aunque se originó en Europa, actualmente se utiliza de manera oficial en casi todo el mundo, si



A la izquierda, recreación artística de Cristóbal Clavio (Christophorus Clavius), que realizó una destacada labor en la preparación del calendario gregoriano. Abajo, en una foto del firmamento con exposición muy larga, como esta, las estrellas aparecen movidas, trazando círculos concéntricos, como consecuencia de la rotación de la Tierra. La única que gracias a su posición permanece esencialmente quieta, y que está en el centro del «tornillo», es Polaris, la estrella polar.



bien en algunos países lo es de manera simultánea con los calendarios procedentes de sus culturas iniciales.

La reforma gregoriana, además de redefinir los años bisiestos, tuvo que corregir el desfase de los 10 días de adelanto, así que el papa Gregorio XIII decidió arrebatarlos a la humanidad, de manera que al día 4 de octubre de 1582, jueves, le siguió el viernes 15 de octubre de 1582, diez días que desaparecieron pero no de forma simultánea en todos los países que aceptaron la reforma, ya que si bien el calendario gregoriano se adoptó inmediatamente en los países católicos, no fue así en los países protestantes, anglicanos u ortodoxos, donde se implantó más tarde.

CURIOSIDADES RELATIVAS A LOS 10 DÍAS QUE PERDIÓ LA HUMANIDAD

Los ajustes en el calendario ordenados por el papa Gregorio XIII, que implicaron pasar del 4 al 15 de octubre de 1582, provocaron, en función de su implantación temprana o tardía, una serie de anécdotas históricas.

Ni Miguel de Cervantes ni William Shakespeare murieron el 23 de abril de 1616.

El 23 de abril de cada año se celebra el *Día del Libro*, que conmemora la muerte de William Shakespeare y Miguel de Cervantes en 1616, lo cual no es cierto en ninguno de los dos casos.

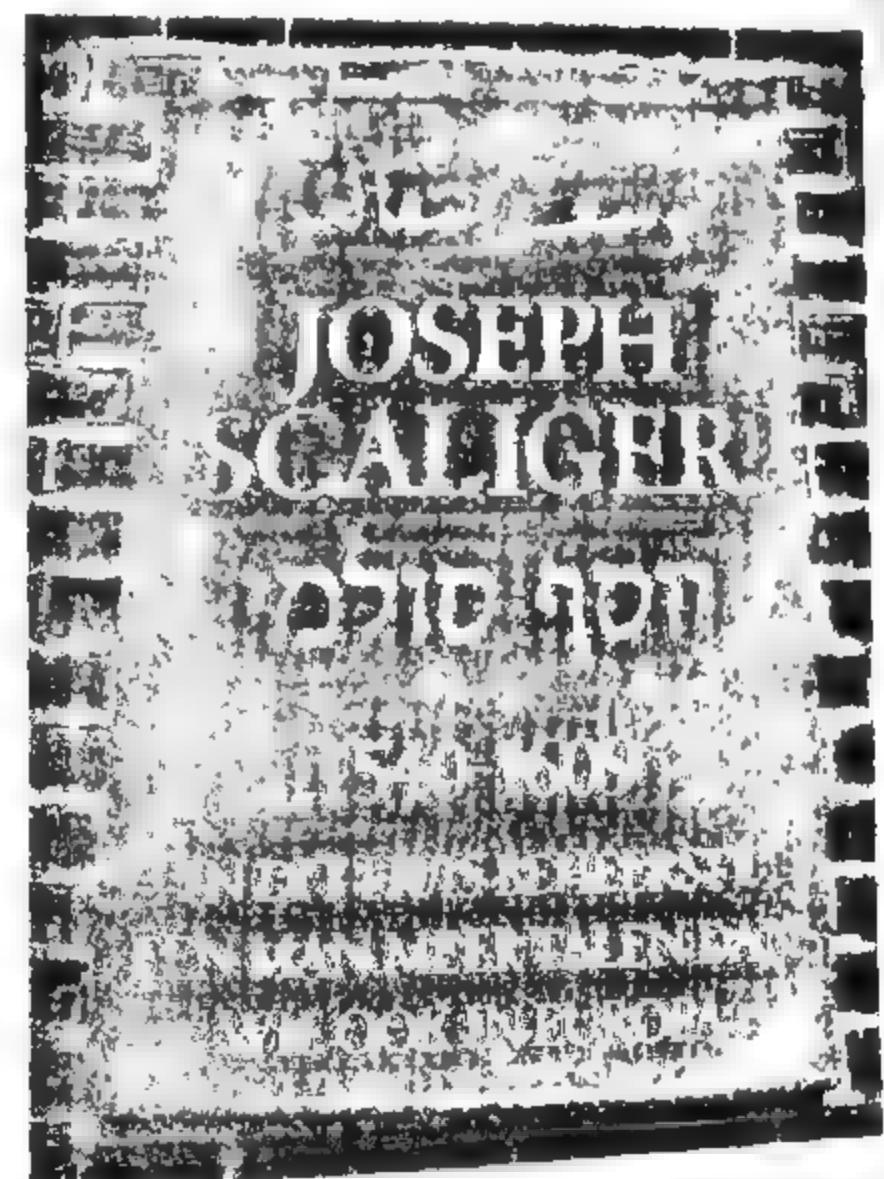
Miguel de Cervantes murió un 22 de abril del año 1616 en Madrid, pero no fue hasta el día 23 cuando se verificó su austero entierro en el Convento Trinitario tras un día de velatorio en su casa. El registro consta en la parroquia de San Sebastián, la suya, el día 23 de abril, pues en aquella época se registraba la fecha del entierro. Estas fechas están referidas al calendario gregoriano, ya que España lo adoptó desde sus inicios en 1582. William Shakespeare, a diferencia de Cervantes, sí murió el

DÍAS JULIANOS

Un inconveniente que tiene el año gregoriano es el hecho de que no existe un año cero. En consecuencia, cuando se desea conocer el intervalo de tiempo comprendido entre una fecha antes de Cristo y otra después de Cristo no basta con restar las cifras correspondientes a los años (consideradas las fechas anteriores al nacimiento de Cristo como negativas), sino que es preciso restar una unidad al resultado. También hay recordar que cuando comenzó el siglo XX muchas personas creían que el año 2000 era el primero del nuevo siglo cuando realmente era el último año del siglo XX, precisamente porque el primer año del siglo I comenzó por el año 1 y no por el año 0.

Atajo para el trabajo con calendarios

A fin de poder realizar los cálculos de los intervalos de tiempo con una simple resta se utiliza el día juliano creado por Joseph Justus Scaliger (1540-1609), quien construyó una escala continua de tiempo fijando su origen (inicio del día 1) al mediodía del 1 de enero del año 4713 a.C., contando los días solares consecutivos y sus fracciones. Para averiguar un lapso de tiempo entre dos fenómenos astronómicos hay que considerar los años bisiestos y, si son diferentes tipos de calendarios, tener en cuenta los días suprimidos por el papa Gregorio XIII. Así que realmente los días julianos son muy utilizados. A modo de ejemplo digamos que el 30 de mayo de 2017 a medianoche (tiempo universal) es el 2457905,5.



Izquierda, retrato de Joseph Justus Scaliger, creador del día juliano. Derecha, placa conmemorativa dedicada a Joseph Justus Scaliger en una calle de la ciudad de Leiden, Países Bajos.

23 de abril de 1616, pero en ese año regía en Inglaterra el calendario juliano. El gregoriano no fue usado allí hasta 1752. Por lo tanto, el 23 de abril en Inglaterra correspondía al 3 de mayo de 1616 en España, ya que la diferencia entre ambos calendarios era de 10 días.

Santa Teresa de Jesús no fue enterrada 11 días después de su muerte.

Italia, España y Portugal fueron los primeros países en establecer el calendario gregoriano. Esta medida dio lugar a paradojas como la del funeral de Santa Teresa de Jesús. Ella falleció el 4 de octubre de 1582, en el monasterio de Alba de Tormes, y fue enterrada al día siguiente: 15 de octubre.

Newton no nació el mismo año que murió Galileo.

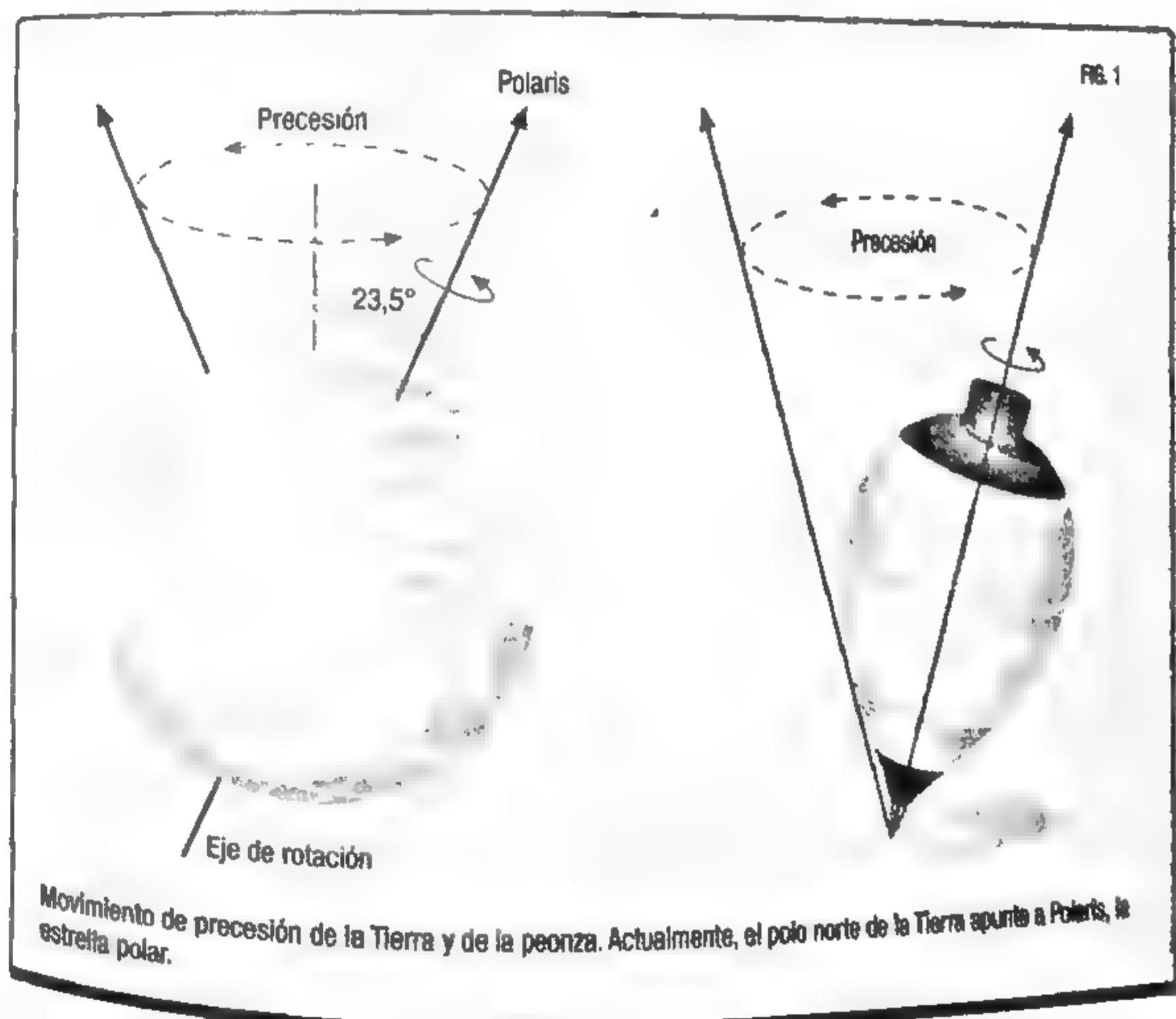
Galileo murió en Arcetri el 8 de enero de 1642, según el calendario gregoriano, que era el que regía en Italia desde sus inicios. Newton nació el 25 de diciembre de 1642, según el calendario juliano que seguía en vigor en Inglaterra. En esa época el desfase ya era de 11 días. Por lo tanto, según el calendario gregoriano Newton nació el 4 de enero de 1643. No fue pues en el mismo año que Galileo. La resistencia de los ingleses a adoptar el calendario gregoriano llevó al astrónomo Johannes Kepler a decir aquello de que «los protestantes prefieren que su calendario esté en desacuerdo con el Sol a que esté de acuerdo con el papa».

La Revolución de Octubre fue en noviembre.

El calendario gregoriano se implantó por primera vez en Rusia en febrero de 1918. Por lo tanto la Revolución de Octubre de Lenin en Petrogrado del 25 de octubre de 1917, según el calendario juliano, tuvo lugar el 7 de noviembre de 1917 en el calendario gregoriano, ya que en aquel entonces la diferencia entre los dos calendarios era ya de 13 días.

PRECESIÓN DE LOS EQUINOCCIOS

La Tierra, además del movimiento de traslación y del de rotación, que determinan en buena medida la estructura de nuestro horario y la de nuestro calendario, tiene algunos más. El más importante de estos otros es el de *precesión*. La precesión de los equinoccios corresponde al movimiento que sufre el eje de rotación terrestre, que describe un cono alrededor de la vertical de la eclíptica. Esto es consecuencia de la inclinación del eje de rotación terrestre sobre el plano de la eclíptica y, aunque este movimiento es muy lento, da lugar a que el polo norte se desplace en ese cono con un periodo de unos 25 776 años. El movimiento de precesión se da en todos los cuerpos que giran en torno a ellos mismos y también se desplazan en un campo gravitatorio, como en el caso de los trompos o las peonzas (figura 1). Actualmente



corresponde a un desplazamiento angular de 50,29 segundos de arco por año.

Se cree que el primero que observó la precesión de los equinoccios fue Hiparco de Nicea, con una aproximación extraordinaria para la época. Las fechas exactas no son conocidas, pero las observaciones astronómicas atribuidas a Hiparco por Ptolomeo datan del 147 al 127 a.C. Hiparco determinó la diferencia entre el año trópico y el año sidéreo, es decir, que el movimiento del punto Aries (equinoccio de primavera) era del orden de 1° al año. Debido a este giro del eje de la Tierra, el fondo de estrellas que vemos en el cielo varía lentamente con el tiempo, y el polo norte cambia de estrella a la que apunta.

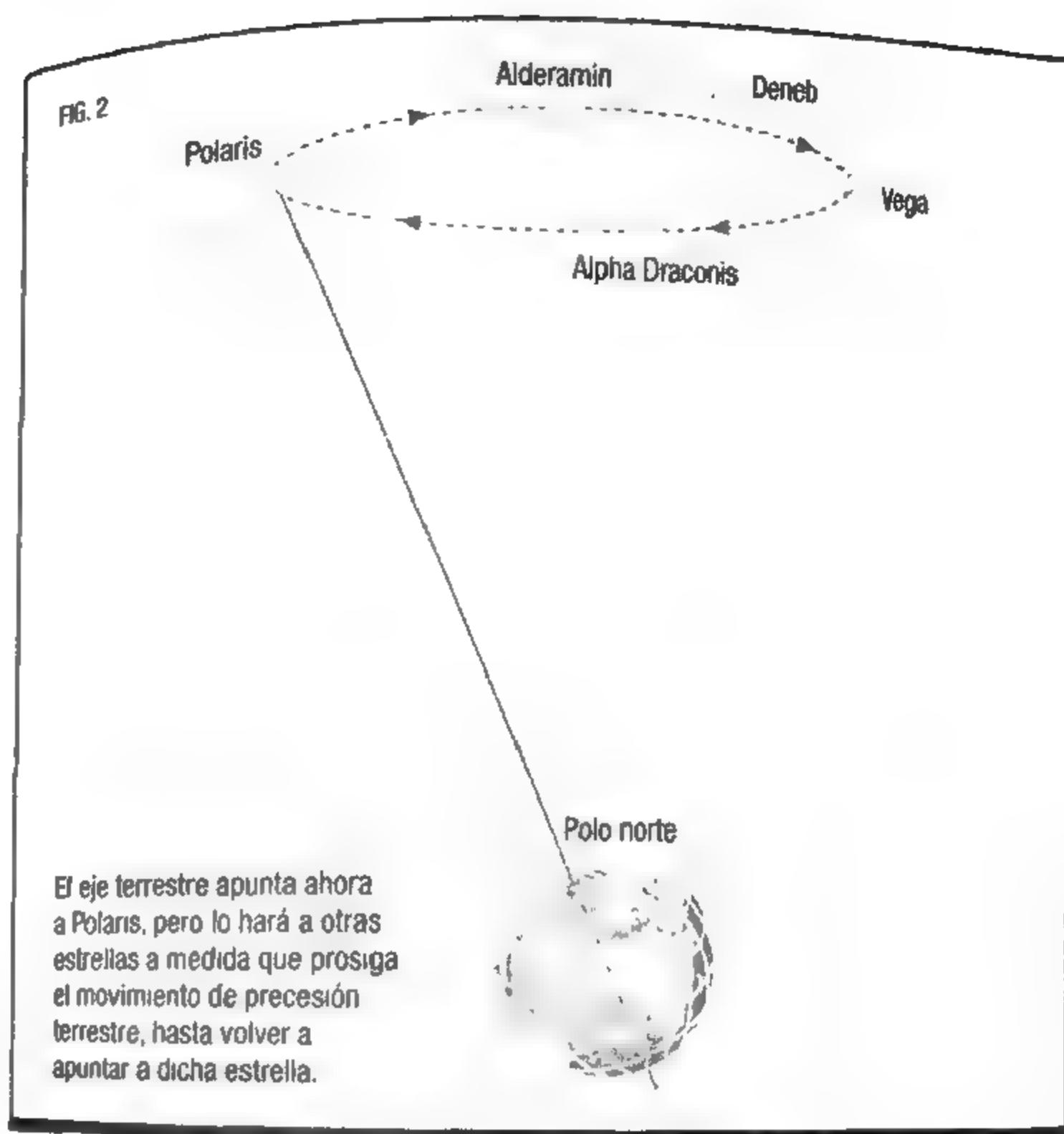
Hoy en día, el eje de la Tierra apunta a Polaris, la actual estrella polar, que está encima de nuestro polo norte. Con el paso del tiempo, el eje de la Tierra irá apuntando sucesivamente a Alpha Draconis, Vega, Deneb y Alderamin hasta apuntar de nuevo a Polaris, habiendo tardado un tiempo estimado en 25 776 años para completar el ciclo (figura 2).

Desfase en los signos del zodíaco usados en los horóscopos

El equinoccio de primavera tiene lugar normalmente el 21 de marzo (puede variar unas horas según el año), cuando el Sol está en el punto Aries. Cuando se definió el zodíaco, el punto Aries estaba en la constelación de Aries, de la que tomó el nombre, pero actualmente no está en ella. Si consideramos el movimiento de precesión después de 2000 años, que aproximadamente es el tiempo transcurrido, se deduce que se ha desplazado:

$$50,29 \text{ segundos de arco} \cdot 2000 = 27,94 \text{ grados.}$$

Esto son casi 30 grados, es decir, un signo del zodíaco de desfase. Si se dividen los 360° por los 12 signos del zodíaco, cada uno corresponde a 30°. En consecuencia, transcurridos 2000 años, el punto Aries está en la constelación de Piscis, tal como se puede apreciar en cualquier planisferio celeste.



Así, los signos del zodíaco que emplea la pseudociencia de la astrología realmente están un signo desplazados. En los horóscopos se está usando una distribución de hace dos milenios.

El sistema solar

La definición de nuestro barrio estelar fue posible gracias al reconocimiento de los planetas visibles y al posterior descubrimiento de los que no pueden verse a simple vista. Así, la humanidad ha tomado conciencia de que el sistema solar es un conglomerado complejo de objetos cuya exploración arroja información sobre nuestro propio origen.

En cuanto la humanidad comenzó a observar el cielo nocturno percibió que todas las estrellas se movían desde la zona este a la zona oeste, manteniendo sus distancias entre ellas, y que había algunos objetos, muy pocos, que mostraban un movimiento único entre sí. Cada cultura intentó dar una explicación a este movimiento especial, y según su progreso científico, dicha tentativa de justificación dio lugar a distintas soluciones.

Los registros astronómicos más antiguos se pueden hallar en la antigua Sumeria. Los babilonios heredaron sus tradiciones astronómicas y desarrollaron su propia cultura al respecto que, con el tiempo, llegaría hasta nuestros días. Tanto es así que todavía usamos algunas constelaciones introducidas entre los años 3000 y 2000 a.C., como Leo, Tauro, Escorpio, Géminis, Capricornio, Sagitario y Auriga. El zodíaco, de hecho, fue creado por los babilonios; en él se recogían las doce constelaciones a través de las cuales el Sol, la Luna y los planetas viajan por el firmamento. También hicieron predicciones sorprendentemente acertadas que han perdurado hasta la actualidad.

El texto cuneiforme de la Tablilla de Ammisaduqa habla de la aparición de Venus al amanecer y su desaparición al atardecer.

Así pues, cabe deducir que los astrónomos babilonios entendían que Venus era el mismo objeto pese a aparecer en diferentes momentos del día. También llegaron a calcular su *ciclo sinódico* (es decir, el tiempo que tardaba en volver a aparecer en el mismo punto en el firmamento). Según esta tablilla, que recoge las observaciones de Venus durante un periodo de unos 21 años, la duración de un ciclo venusiano era de 587 días. Solo se equivocaron en tres, evidenciando que los babilonios entendían que los eventos planetarios eran periódicos.

El análisis de unas tablillas escritas entre los años 350 a.C. y 50 a.C., que se encuentran en el Museo Británico, ha revelado que los antiguos astrónomos utilizaban sofisticadas técnicas de geometría para calcular la posición de los planetas, un método cuyo desarrollo se atribuía hasta ahora a los sabios europeos del siglo XIV.

Los cálculos relatados en las tablillas, basados en la superficie de un trapezoide, describen el movimiento de Júpiter a lo largo de la eclíptica. En concreto, abarcan un periodo de 60 días a partir de aquel en el que el planeta aparece por primera vez en el horizonte del cielo nocturno, justo antes del amanecer. También aparecen cálculos del tiempo requerido por Júpiter para cubrir la mitad de su trayectoria eclíptica. El planeta gigante, uno de los favoritos entre los babilonios, representaba a Marduk, la deidad patrona de la ciudad de Babilonia.

Los babilonios desarrollaron ideas matemáticas y geométricas abstractas relacionando el movimiento, la posición y el tiempo. Estas tablillas son ejemplos del uso de la geometría en los cálculos de las posiciones en el espacio-tiempo.

Los babilonios también creían que los astros tenían poder sobre los seres humanos. En efecto, el Sol, la Luna y los planetas eran fenómenos naturales como lo puede ser la lluvia, por ejemplo, y por esta razón los astros debían tener una influencia principal sobre la vida de las personas. Hay que reconocer que en muchos pueblos primitivos, e incluso en tiempos más actuales, existía una fuerte relación entre astrología y astronomía.

Los astrónomos comenzaron a registrar observaciones para poder encontrar la periodicidad de los fenómenos de mal agüe-



Arriba izquierda, tablilla babilónica que recoge la observación del cometa Halley hacia el 22-28 de septiembre del año 164 a.C. Arriba derecha, tablilla de Venus de Ammisaduqa. Abajo, Marduk, representado por el planeta Júpiter, era el creador de los mundos, el dios más importante del panteón babilónico, por lo que no es de extrañar que trazaran con mucha atención su órbita.

ro asociados a cada planeta, y elaboraron modelos matemáticos para poder predecirlos directamente, sin necesidad de consultar las listas de observaciones anteriores.

En cuanto a la astronomía griega, estuvo dominada por Aristóteles y Ptolomeo, cuyos modelos incorrectos se mantuvieron vigentes durante casi dos milenios. Según ellos, el mundo debía tener una forma esférica con la Tierra inmóvil en el centro, y todos los cuerpos celestes se movían a velocidad constante describiendo circunferencias. Para explicar los movimientos retrógrados de los planetas el sistema se fue llenando de múltiples esferas encajadas unas dentro de otras. La zona más allá de la órbita de la Luna era el reino de la perfección y la inmutabilidad, mientras que por debajo de ella se representaba la zona de la imperfección y del cambio.

Durante el Imperio romano se dio poco impulso al estudio de las ciencias y de la astronomía. Roma era una sociedad práctica que tenía más interés en la técnica y no consideraba tan útil a la ciencia. En este periodo, la astronomía mantuvo los conocimientos griegos basados en teorías geocéntricas y la existencia de los cinco planetas visibles a simple vista, con especial mención del Sol y la Luna. Precisamente, entre su legado, que ha llegado hasta nuestros días, están los nombres que damos a muchos de los objetos del sistema solar.

En realidad, los nombres de los planetas y muchos de los satélites del sistema solar e incluso el propio Sol proceden primero de dioses griegos y después de los nombres que dichas divinidades recibieron por parte del Imperio romano, cuando la mayoría de las ciudades helenas cayeron en sus manos en el siglo II a.C.

El Sol proviene del dios Helios, quien conducía el carro solar que llevaba calor y luminosidad a toda la Tierra. Después de su trabajo diario se detenía a descansar en la isla de Rodas, donde tuvo siete hijos con la bella Rode, a los cuales inculcó la profesión de la astronomía. Como homenaje, los habitantes de la isla construyeron el Coloso de Rodas (una de las siete maravillas del mundo antiguo).

El nombre de Mercurio procede del dios griego Hermes. Él, el dios mensajero, era hijo de Zeus, tenía una personalidad muy

fogosa y se movía muy rápido. Venus, por su parte, es el nombre romano de la diosa del Amor, Afrodita para los griegos. Se cree que la belleza del planeta, por su brillantez y esplendor, tiene que ver con la hermosura atribuida a Afrodita.

La Tierra, para los romanos, no es otra que la diosa Gea, que es precisamente la madre de todos los dioses, a excepción de Tártaro, su padre. Selene, en la mitología griega, era la diosa lunar, siendo la Luna su equivalente entre los dioses romanos.

Marte, el *planeta rojo*, es el nombre romano del dios de la guerra, Ares. Posiblemente su aspecto rojizo se relaciona con la sangre derramada por el belicoso dios, hijo de Zeus. Zeus adoptó el nombre de Júpiter en la cultura romana y es el máximo dios del Olimpo, otorgando su identidad al mayor de los planetas. Para los romanos el último planeta que restaba era Saturno, el padre de Júpiter, que en la cultura griega correspondía a Cronos.

UNA MIRADA A LOS PLANETAS: GALILEO

Hubo que esperar a Galileo Galilei (1564-1642) para obtener una imagen mucho más detallada de los cinco planetas conocidos desde la Antigüedad que lo logrado en cualquier observación previa. Con el uso de su telescopio, el sistema solar se transformó en algo completamente novedoso y que permitía dar muestras de comportamientos heliocéntricos y de movimientos no geocéntricos. Además de construir y mejorar dicho instrumento, el trabajo experimental de Galileo como complemento de sus escritos sirvió para establecer el moderno método científico. Sus trabajos realmente representaron una ruptura con las teorías aristotélicas bien asentadas hasta entonces.

Galileo, como profesor en la Universidad de Pisa y de Padua, enseñó mecánica, matemáticas y astronomía, y explicó los principios del sistema de Aristóteles y Ptolomeo, aunque es muy posible que ya comenzase a estar convencido de la exactitud del modelo de Copérnico, incluso careciendo de pruebas experimentales sobre él.

En diciembre de 1604, Galileo observó una nova (la llamada estrella de Kepler) que daba al traste con la inmutabilidad del cielo aristotélico, si bien sus defensores no se dieron por aludidos. De hecho, cuando Galileo era niño, en 1572, ya había aparecido en el cielo otra nova (la llamada nova de Tycho, porque fue el que más la estudió). Estos fenómenos fruto de la explosión de una estrella son realmente raros, así que Galileo tuvo mucha suerte de poder contemplarlos de ellos a lo largo de su vida.

No me siento obligado a creer que el mismo Dios que nos dio sentidos, razón e intelecto pretenda que olvidemos su uso.

GALILEO GALILEI

de París una carta de uno de sus antiguos alumnos, que le confirmaba la existencia de un aparato que permitía ver objetos lejanos e incluso estrellas invisibles a simple vista. Con esta descripción, construyó su primer telescopio, que aumentaba seis veces los objetos y que también era el único de la época que conseguía obtener una imagen no invertida. Este instrumento introdujo un gran giro en los trabajos de Galileo. El 21 de agosto terminó su segundo telescopio, que aumentaba ocho o nueve veces, y lo presentó al Senado de Venecia, con una demostración en la Plaza de San Marcos. Galileo legó sus derechos a la República de Venecia para usos militares, y se liberó de las dificultades financieras.

El propio Galileo reconoció en marzo de 1610 que, aunque había construido más de 60 telescopios, no todos tenían la misma calidad y solo unos pocos eran adecuados para la observación astronómica.

La Luna

Desde el primer momento en que Galileo observó la Luna con su telescopio se dio cuenta de que su superficie no era lisa como se creía (se pensaba que en el mundo supralunar solo existían formas geométricas perfectas, como las esferas), sino que se encontraban montañas y valles. Incluso dio datos sobre el des-

plazamiento aparente de luces y sombras. Galileo realizó unos magníficos dibujos de la superficie lunar e investigó sobre los movimientos de nuestro satélite.

Estudió el *terminador* (línea que divide la zona iluminada de la zona en penumbra), el cual no es uniforme sino que presenta irregularidades (y por consiguiente invalidaba la teoría aristotélica). Existían allí zonas de escasa luz y sombras, lo que probaba la existencia de montañas. Detectó los cráteres como manchas oscuras en las zonas iluminadas con contornos luminosos, cuyas sombras disminuían cuando se incrementaba la zona iluminada. Se trataba del mismo efecto que produce el Sol cuando aparece en el horizonte, ya que primero se iluminan las cimas de las montañas y a medida que se eleva lo van siendo zonas más amplias. También comparando la superficie lunar con la terrestre dedujo Galileo que las grandes manchas más oscuras (llamadas *mares lunares*) estaban por debajo de la superficie que las rodeaba. Precisamente, esa tonalidad era similar a la de los mares terrestres, que son más oscuros en comparación con la tierra firme.

Galileo estimó la altura de las montañas de la Luna en unos 7000 m. Cuando publicó sus observaciones en su obra *Siderius nuncius* pensaba que eran más elevadas que las de la Tierra, si bien en realidad son equivalentes.

Las estrellas fijas

Cuando en 1610 Galileo observó las estrellas fijas usando el telescopio, se dio cuenta de que no aumentaban de tamaño y de que no tenían forma esférica como sucedía con los planetas. Además, constató que era posible observar otros astros que no se veían a simple vista. Por ejemplo, en el cúmulo estelar de las Pléyades encontró muchas más estrellas que las conocidas hasta entonces.

Asimismo, Galileo observó la Vía Láctea e interpretó que esa mancha blanquecina que surca el cielo era un conglomerado de estrellas.

Los satélites de Júpiter

El día 7 de enero de 1610, Galileo observó por primera vez los principales satélites de Júpiter. Unos meses antes había contemplado el planeta, pero como el telescopio no era muy bueno no había podido ver los satélites. Se sorprendió al ver tres pequeños astros muy brillantes alineados cerca de Júpiter. Al día siguiente, volvió a observar el planeta y vio que esos pequeños astros habían variado su posición. Posteriormente vio que uno de ellos había desaparecido y que los otros habían cambiado de lugar. Dedujo que el que no se veía estaría oculto detrás de Júpiter. El 13 de enero, Galileo observó cuatro satélites al mismo tiempo. Interpretó que giraban en torno a Júpiter como Mercurio y Venus lo hacen en torno al Sol y consiguió determinar que los que se hallaban más próximos al planeta se movían más rápido que los más alejados. Las observaciones se publicaron en *Siderius nuncius*.

Con el objetivo de ganar el mecenazgo de Cosimo II de Médici, Gran Duque de la Toscana, denominó a los cuatro satélites como «*Planetas Mediceos*», relacionándolos con los cuatro hermanos: Francisco, Carlos, Lorenzo y Cosme. Hoy en día se conocen como los *satélites galileanos*: Io, Europa, Calisto y Ganímedes.

Júpiter y sus cuatro satélites conforman un pequeño sistema solar que muestra que no todos los cuerpos celestes giran alrededor de la Tierra, corrigiendo a los aristotélicos, y además también muestra que no todos los cuerpos giran en torno al Sol, corrigiendo a algunos copernicanos.

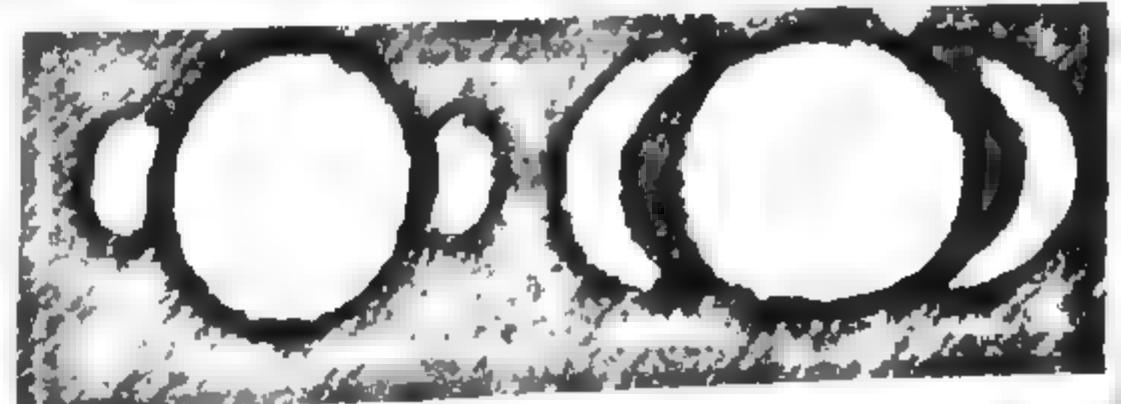
Saturno

El 25 de julio de 1610, Galileo orientó su telescopio hacia Saturno y se sorprendió al ver una esfera con dos protuberancias parecidas a orejas o asas. Creyó que Saturno era un conjunto de tres astros.

Un par de años más tarde, en diciembre de 1612, al observar Saturno de nuevo, no pudo ver sus asas. Aparecía solo como una

SATURNO SEGÚN RUBENS

Algunos pintores de siglos pasados han acabado resultando inesperados cronistas gráficos de acontecimientos de su época. Un caso interesante es el del pintor Peter Paul Rubens, también conocido como Pedro Pablo Rubens. Nacido en 1577 en la ciudad alemana de Siegen y fallecido en 1640 en Amberes (Bélgica), se convirtió en uno de los artistas de Flandes más célebres. Hay una pintura de Rubens que tiene un interés astronómico como dato de observación. Se trata del cuadro titulado *Saturno devorando a un hijo*, que Rubens pintó en 1636. Para dar noticia del ser mitológico representado, Rubens no recurre a escribir su nombre (Saturno) como en ocasiones hacen algunos pintores sino que sobre la cabeza del dios dibuja tres estrellas (la central de mayor brillo), tal como Galileo había descrito en sus observaciones de este planeta con anterioridad a la creación del cuadro. Ello demuestra que Rubens tenía conocimiento de los logros científicos realizados unas pocas décadas antes.



Arriba, Saturno pintado por Rubens en 1636 tras conocer la interpretación de Galileo como cuerpo triple y detalle de la parte superior del cuadro. A la derecha, Saturno según Galileo.

pequeña esfera. Parecía como si Saturno hubiera «devorado a sus hijos» y no sabía cómo explicar este fenómeno.

Pero el 3 de septiembre de 1616, comunicó en una carta que había observado de nuevo las extrañas orejas y que ahora eran mucho mayores y no tenían una forma redonda sino que parecían dos medias elipses. Galileo observó los anillos de Saturno pero no consiguió identificarlos como tales. Serían necesarias varias décadas y la utilización de telescopios más perfectos para que Christiaan Huygens pudiera observar finalmente su verdadera forma.

Venus

En septiembre de 1610, prosiguiendo con sus trabajos, Galileo descubrió las fases de Venus. Con fecha 30 de diciembre de 1610, escribió una carta al matemático Cristóbal Clavio (Christophorus Clavius) para explicarle sus observaciones, desarrolladas durante tres meses, y poder discutir sus investigaciones al respecto. Galileo resumió que a veces veía el planeta en el cielo matutino como un fino arco lunar. Día a día, observó que Venus disminuía de diámetro conforme aumentaba la superficie iluminada por el Sol, alcanzando una forma de semicírculo, y que después iba adquiriendo otra cada vez más circular, reduciendo su tamaño hasta acabar como una pequeña esfera blanquecina en sus apariciones vespertinas.

Estas observaciones fueron para Galileo la prueba de que Venus giraba en torno al Sol. Constituían una demostración de la verdad del sistema copernicano, pues era fácil interpretar este fenómeno gracias a la hipótesis heliocéntrica (figura 1) y, en cambio, muy difícil de explicar bajo una hipótesis geocéntrica (figura 2).

LAS MANCHAS SOLARES

En 1610, el matemático y jesuita Christoph Scheiner (1575-1650) comenzó a construir telescopios y se cree que fue el primer europeo en observar las manchas solares (los astrónomos chinos

Las fases de Venus predichas con el sistema heliocéntrico. Así se ven en las observaciones con telescopio.

FIG. 1

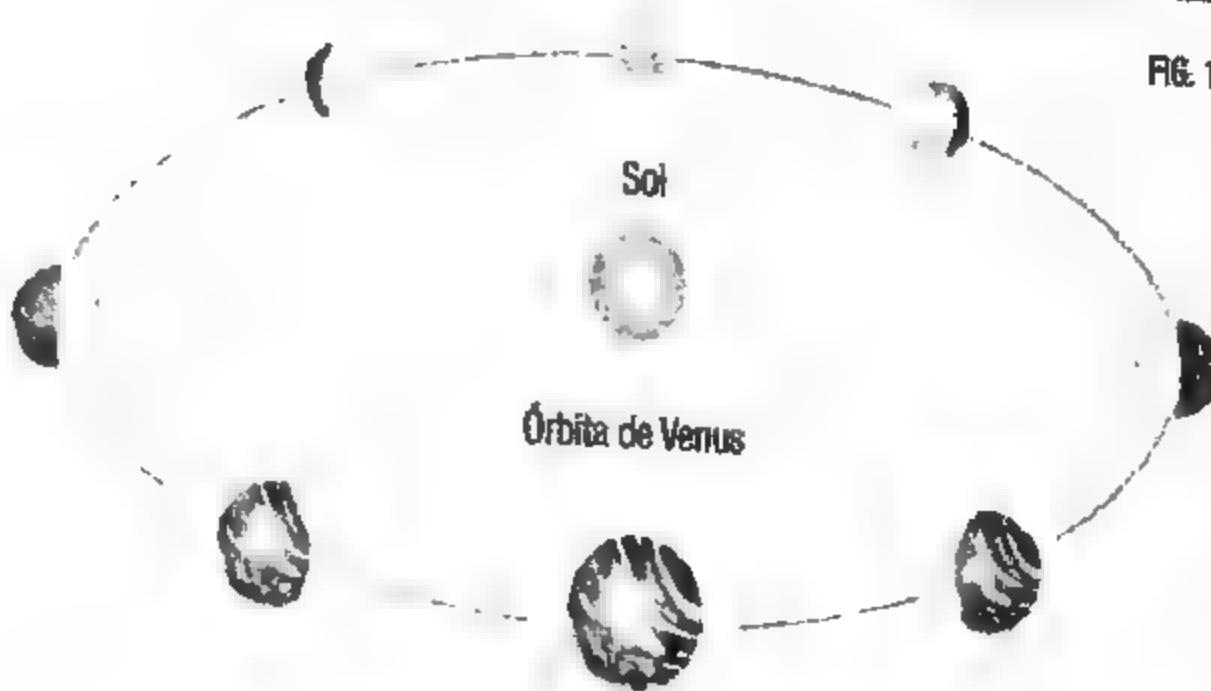
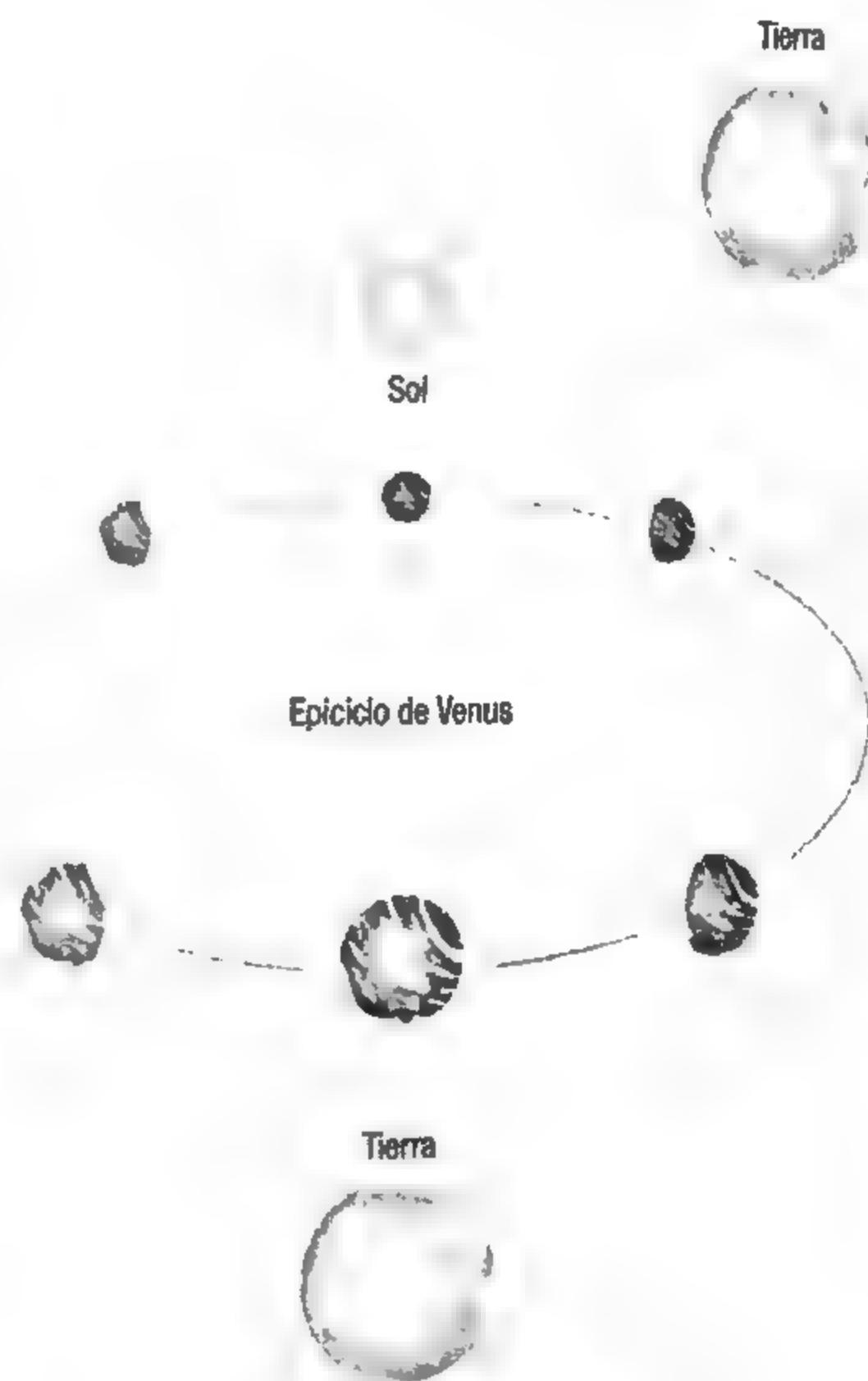


FIG. 2



Las fases de Venus predichas con el sistema geocéntrico que imperaba en tiempos de Galileo. No es así como se ven en las observaciones con telescopio.

hacia siglos que lo hacían). Inicialmente usaba lentes opacadas para proteger sus ojos, pero después usó el método de proyección ideado por Kepler. En marzo de 1611, descubrió las manchas, aunque debido a sus ideas religiosas no lo publicó porque contradeciría el concepto aristotélico del Sol perfecto. Y esto le llevó a decir que no eran más que satélites. Se sabe que Galileo no conocía las observaciones del jesuita y que en abril de 1611 habría enseñado a muchas personas la existencia de esas manchas.

En aquella época, los telescopios llegaron casi al mismo tiempo a muchos científicos, lo que hizo que compitieran con sus descubrimientos para ganar el favor de sus mecenas. Así que Galileo tuvo sus disputas con Scheiner acerca del descubrimiento de las manchas solares. Lo que sí es cierto es que Galileo, al no tener los prejuicios del jesuita, explicó su significado mejor que él.

En una carta fechada el 14 de agosto de 1612, Galileo afirmó que estas se encuentran sobre la superficie solar o muy cerca de ella. Dijo que no son cuerpos como los satélites o planetas y que en cambio son mutables. Aparecen y desaparecen a medida que pasan los días y cambian su forma y su tonalidad, y cada una parece tener su propia evolución. Galileo observó que algunas surgen formando racimos que parecen juntarse en una única mancha, y que en cambio otras proceden de una sola que se divide y forma varias más pequeñas. Pero todas recorren el disco solar siguiendo líneas paralelas entre sí, en una franja de 29 grados al norte o sur respecto del diámetro máximo solar.

Galileo dio una sencilla explicación a todas las observaciones. Como todas las manchas manifestaban siempre el mismo movimiento, había que deducir que este estaba provocado por una sola causa. Además, cuando las manchas estaban próximas a la circunferencia exterior, conservaban la misma anchura pero perdían longitud, lo cual es un efecto de la perspectiva cuando un cuerpo se mueve en una esfera. Asimismo, el espacio recorrido en tiempos iguales por la misma mancha decrecía a medida que estaba más próxima a la circunferencia y era máximo en el centro de la misma. Así, cuando dos manchas se hallaban en el centro de la esfera, podía verse una separación mayor entre ellas, mientras que cuando se hallaban cerca de la circunferencia algunas inclu-

so parecía que se tocaban. De estos razonamientos dedujo dos cosas: que el Sol era esférico, y que las manchas se encontraban en su superficie. E incluso llegó a calcular el movimiento de rotación del Sol.

A título anecdótico hay que mencionar que en 1588 muchos científicos aseguraron haber visto en París una mancha en el Sol durante ocho días. Con la concepción aristotélica, la única explicación posible era que la mencionada mancha podía ser Mercurio, si bien este solo puede estar en conjunción con el Sol a lo sumo siete horas. Con el descubrimiento de las manchas solares quedaba resuelto este enigma.

PRUEBAS DEL HELIOCENTRISMO Y RELACIÓN CON EL SANTO OFICIO

Frente al razonamiento deductivo basado en Aristóteles y las Sagradas Escrituras del sistema geocéntrico, Galileo presentó el razonamiento inductivo basado en sus observaciones y el método científico. El enfrentamiento estaba servido.

Aunque Galileo no consiguió demostrar el movimiento de la Tierra, sí logró diversas pruebas de lo erróneo que era seguir en el geocentrismo:

- Las montañas en la Luna, que refutaban la tesis aristotélica de una esfera lisa e inmutable.
- Las nuevas estrellas no observables a simple vista y que además las estrellas no aumentaran de tamaño, lo cual probaba la tesis de Copérnico de que existía una enorme distancia entre Saturno y las estrellas fijas.
- Los satélites de Júpiter, que constituyan una importante prueba de que no todos los cuerpos celestes giraban en torno a la Tierra, sino que había cuatro que lo hacían alrededor de Júpiter.
- Las manchas solares, que también rebatían la perfección de los cielos, y el importante descubrimiento de que el Sol está en rotación.

— Las fases de Venus, que junto con la variación del diámetro del planeta era algo solo compatible con el hecho de que girase alrededor del Sol, ya que tenía menor tamaño cuando estaba en fase llena y mayor cuando estaba en la nueva, lo que contradecía totalmente el sistema de Ptolomeo, donde la distancia a Venus era siempre constante.

Galileo tenía un argumento adicional sobre el origen de las mareas, que no detallamos porque es el único que contenía errores. Galileo pretendía demostrar que las producía el movimiento de la Tierra, mientras que los astrónomos jesuitas ya enunciaban, correctamente, que eran ocasionadas por la atracción de la Luna.

Galileo tenía mucho éxito y parecía convencer a todos, pero los jesuitas del Colegio Romano, partidarios de la teoría geocéntrica, se convirtieron en sus enemigos. Finalmente, el 16 de febrero de 1616, fue convocado por el Santo Oficio para el examen de sus proposiciones. La teoría copernicana fue condenada como «una insensatez, un absurdo en filosofía, y formalmente herética». El 25 y el 26 de febrero de 1616 era ratificada la resolución por la Inquisición y por el papa Paulo V. Se pidió a Galileo que expusiera sus estudios como una hipótesis y no mostrase sus comprobaciones, y esta solicitud fue validada para todos los países católicos.

El 6 de agosto de 1622, el cardenal Maffeo Barberini fue elegido papa con el nombre de Urbano VIII. Galileo tenía muy buena relación con el cardenal desde antiguo y la situación pareció mejorar. En 1624, fue recibido numerosas veces por Urbano VIII y el propio papa le dio la idea de su próximo libro, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, obra que debía mostrar con imparcialidad y a la vez los sistemas aristotélico y copernicano.

El 21 de febrero de 1632, Galileo, protegido por el papa Urbano VIII y el Gran Duque de la Toscana Fernando II de Médici, publicó su *Dialogo*, el cual se desarrolla en Venecia durante 4 días entre tres personajes: Filipo Salviati, un seguidor de Copérnico, Giovanni Francesco Sagredo, un ilustrado sin tomar partido, y Simplicio, un mediocre defensor del modelo aristotélico. Corre el rumor de que el papa Urbano era, en realidad, el simpático

pero poco brillante Simplicio (incluso el nombre es peyorativo). Además, Galileo escribió esta obra en lengua vulgar, en vez de hacerlo en latín, y así pudo llegar directamente al hombre de la calle y tener una mayor difusión. El papa reaccionó posicionándose entre los enemigos de Galileo y se inició un proceso tanto irregular por parte de la Inquisición, pues a pesar de que el libro había pasado el filtro de los censores, se le acusaba de introducir doctrinas heréticas, lo que dejaba en mal lugar a dichos censores. La acusación oficial fue de violar la prohibición de 1616. Galileo fue requerido a confesar, bajo amenazas de tortura si no lo hacía, y recibió promesas de un trato benevolente en caso contrario. Galileo aceptó confesar, lo que llevó a cabo ante el tribunal el 30 de abril de 1633. Una vez obtenida la confesión, se produjo la condena el 21 de junio. Al día siguiente, le fue leída la sentencia, donde se le condenaba a prisión perpetua, y se le exhortaba a abjurar de sus ideas, cosa que hizo seguidamente. Tras la abjuración el papa conmutó la prisión por arresto domiciliario de por vida.

Galileo permaneció recluido en su casa de Florencia desde diciembre de 1633 a 1638. Allí pudo recibir algunas visitas, a quienes dio alguno de los libros que estaba redactando para que los dieran a conocer, y acabaron apareciendo en Estrasburgo y en París.

A HOMBROS DE GIGANTES: NEWTON

Antes de acabar el siglo, Isaac Newton (1642-1727) publicó sus leyes del movimiento y la ley de la gravitación universal, validando definitivamente el sistema heliocéntrico. Fue él quien consiguió demostrar que las leyes de la física del movimiento en la Tierra y en el resto del universo son las mismas.

A partir de Galileo y Kepler, la descripción de los planetas y sus trayectorias podía ya considerarse correcta, pero aún no se conocía por qué sus órbitas eran elípticas y estaban contenidas en un plano. Newton se encargaría de ello.

Newton ingresó en la Universidad de Cambridge en 1661, pero entre 1665 y 1666, a causa de una peste bubónica, desalojaron la

universidad y debió regresar a la granja de su familia. Fue durante este periodo que descubrió la ley de la gravitación, que culminó mucho más tarde, en 1685. Comenzó también a desarrollar

las bases de la mecánica clásica, y empezó a estudiar la naturaleza física de la luz, en la que profundizó entre 1670 y 1672; sin embargo, por temor a

Genio es paciencia.

ISAAC NEWTON

las críticas, guardó silencio durante mucho tiempo sobre sus hallazgos. En 1667 había reanudado sus estudios en la universidad.

Newton enunció la ley de la gravitación universal y las bases de la mecánica clásica, con las tres leyes que llevan su nombre, en los *Principia*. El título completo de la obra es *Philosophiae naturalis principia mathematica*, publicada en 1687. Sobre la ley de la gravitación universal, decía que la intensidad de la fuerza de atracción entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia mutua. A partir de ella, Newton demostró que los planetas debían efectivamente seguir elipses, con el Sol en uno de sus focos, y confirmó las leyes que Kepler dedujo a partir de observaciones. También mostró que los movimientos de los cuerpos celestes no eran siempre elipses. En particular, ciertos cometas seguían otras trayectorias, llamadas paráolas e hipérbolas, con el Sol en sus focos. Finalmente, la ley de la gravitación universal le permitió explicar fenómenos terrestres como las mareas, debidas a la fuerza de atracción de la Luna sobre la Tierra, o bien la forma de nuestro planeta y su abultamiento ecuatorial. Newton fue asimismo el primero en estimar las masas relativas de la Tierra, el Sol y otros planetas.

En cuanto a las leyes de Newton, estas explicaban el movimiento de los cuerpos, así como sus efectos y causas:

- Primera ley de Newton: Todo cuerpo, a no ser que actúen fuerzas externas, permanecerá en reposo o seguirá un movimiento uniforme y rectilíneo.
- Segunda ley de Newton: La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa.

— Tercera ley de Newton: En toda acción hay siempre una reacción igual y contraria; las acciones entre dos cuerpos siempre son iguales y en sentidos opuestos.

Entre sus descubrimientos científicos destacan los trabajos sobre la naturaleza de la luz y sus estudios de óptica, durante los cuales consideró el espectro de color de la luz blanca cuando pasaba por un prisma. Incluso llegó a proponer una teoría sobre el origen de las estrellas y sobre un cosmos infinito bastante interesante, en una famosa carta a Bentley en 1692: «Creo que si la materia de nuestro Sol y nuestros planetas y la materia de todo el universo fue uniformemente dispersada por todo el cielo, y toda partícula tiene una gravedad innata hacia todo el resto... algo de ella pudo reunirse en una masa y otra porción en otra, y así hasta formar un número infinito de grandes masas dispersas a grandes distancias unas de las otras por el espacio infinito. Y así pudieron quizás formarse el Sol y las estrellas fijas, suponiendo que la materia fuera de naturaleza lúcida». Newton dedujo que el universo tiene dimensiones infinitas y que las estrellas están distribuidas en él uniformemente, de modo que no hay ningún centro hacia el cual caer debido a que cualquier estrella recibe la atracción gravitatoria de sus vecinas. Entendía pues que el universo es infinito, continuo, gravitatoriamente estable (ni se expande ni se contrae), y en proporciones grandes, homogéneo. En cualquier caso era un avance respecto a otros conceptos de la época.

Newton demostró que la luz blanca estaba formada por una banda de colores (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, azul y violeta) que podían separarse gracias a un prisma. En consecuencia, dedujo que un telescopio refractor como el de Galileo sufriría de un tipo de deformación, conocida en la actualidad como *aberración cromática*, debido a la dispersión de la luz en diferentes colores producida al atravesar una lente. Para evitar este problema construyó un telescopio con un espejo, llamado *telescopio reflector*.

Sus experimentos sobre la naturaleza de la luz entre 1670 y 1672 le llevaron a formular su teoría general sobre la misma,

EL TELESCOPIO REFRACTOR Y EL REFLECTOR

Los dos tipos principales de telescopios son el refractor y el reflector. Aquí ofrecemos una breve explicación sobre las características de cada uno.

Telescopio refractor

El telescopio refractor (figura 1) se basa en un sistema de lentes convergentes que refractan la luz. Los rayos paralelos, procedentes de un objeto muy alejado, llegan al objetivo y convergen sobre un punto del plano focal; con ello se consigue que los objetos se vean mayores y más brillantes. No está muy claro a quien se debe la invención del primer telescopio. En un momento determinado parece que había en distintos países europeos personas con los conocimientos técnicos capaces de producirlo. Algunos creen que es de origen holandés (Christiaan Huygens) o alemán (Hans Lippershey), pero según el periodista de investigación histórica Nick Pelling el primer autor fue el fabricante de lentes de Gerona Juan Roget, en 1590 (aunque el primero que lo patentó fue el alemán en 1592). En cualquier caso, Galileo, al recibir noticias del nuevo invento, lo construyó y lo utilizó en observación astronómica.

Telescopio reflector

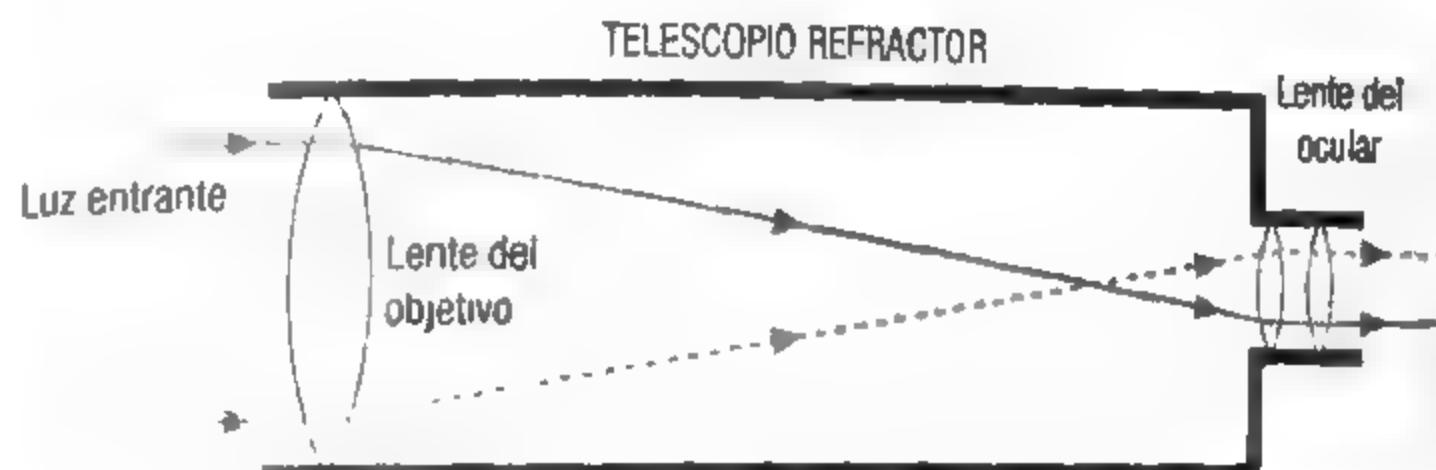
Newton, usando sus conocimientos de óptica, diseñó un telescopio diferente del utilizado por Galileo. El de Newton es de una clase caracterizada por emplear espejos en lugar de lentes para enfocar la luz y formar imágenes (figura 2). Estos telescopios, conocidos como reflectores y a veces también llamados newtonianos, tienen dos espejos: el primario es parabólico y está



Réplica de uno de los telescopios reflectores de Isaac Newton.

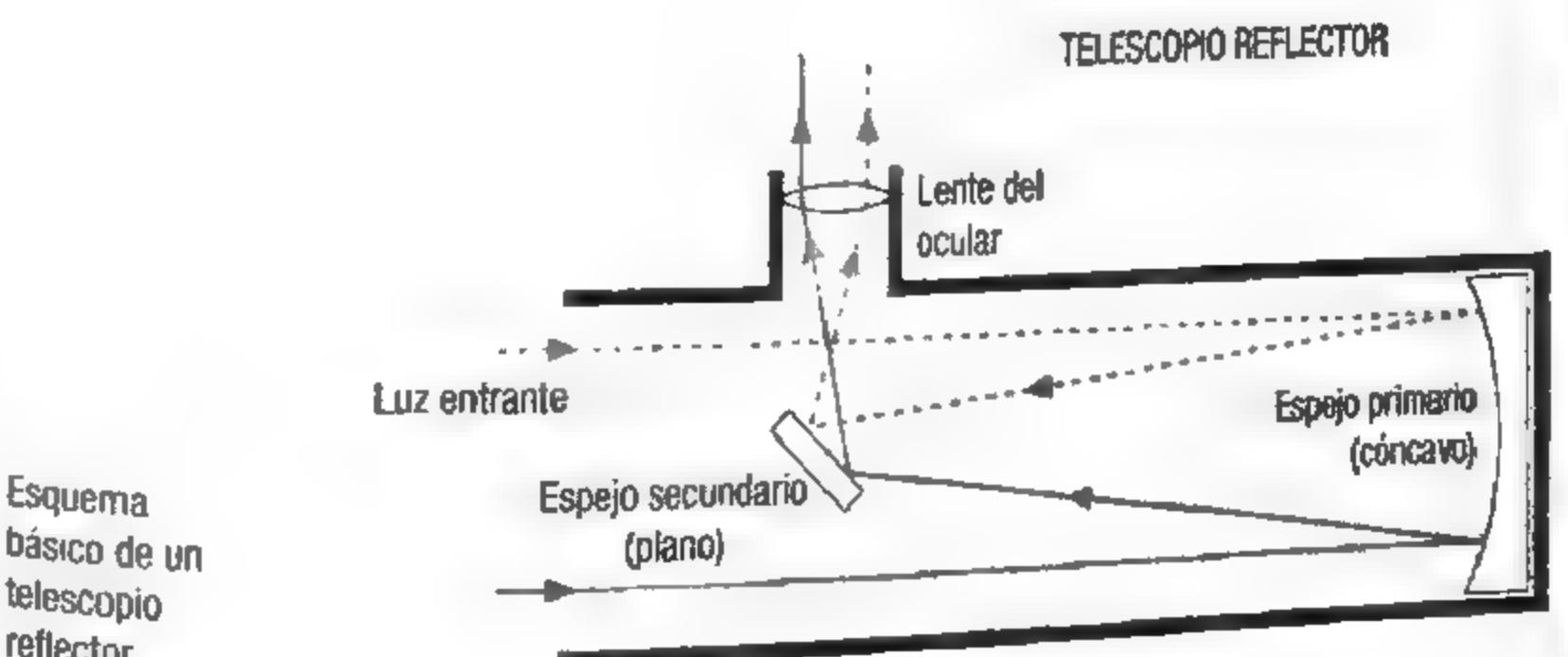
en el extremo del tubo, siendo el que refleja la luz del objeto observado y la envía al espejo secundario, que es plano y envía a su vez la luz al ocular. Los telescopios reflectores tienen varias ventajas con respecto a los refractores. No sufren el efecto de aberración cromática debido a la lente del refractor, para la misma distancia focal pesan menos que este último y además, en cuestión de calidad y apertura parecida, un telescopio reflector es más económico que uno refractor. (El único problema de los reflectores de baja calidad es que si el espejo principal es esférico sufren de aberración por coma).

FIG. 1



Esquema básico de un telescopio refractor.

FIG. 2



Esquema básico de un telescopio reflector.

ciendo que está formada por corpúsculos. Esta teoría fue severamente criticada por la mayor parte de sus contemporáneos, que sostenían ideas diferentes defendiendo una naturaleza ondulatoria. En 1704, Newton escribió su obra más importante sobre óptica, *Opticks*, en la que exponía además un estudio detallado sobre la refracción, la reflexión y la dispersión de la luz. A raíz de los estudios de la naturaleza de la luz, en el siglo xix apareció un nuevo método de investigación que permitió el análisis de la naturaleza física de los astros y dio origen a la astrofísica.

Aunque su teoría corpuscular de la luz fue pronto desacreditada en favor de la teoría ondulatoria, actualmente se ha llegado a la conclusión (gracias a los trabajos de Max Planck y Albert Einstein) de que la luz tiene una naturaleza dual: es onda y corpúsculo al mismo tiempo y en esta idea se basa la mecánica cuántica.

La revolución científica que comenzó con Copérnico se cerró con la gran obra de Newton, quien reconoció sus logros gracias a estar subido «a hombros de gigantes». Newton escribió esta frase en una carta a Hooke, con fecha 15 de febrero de 1676, donde le confesaba: «Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes».

LOS PLANETAS MODERNOS

Los antiguos conocían los cinco planetas observables a simple vista y los identificaban con algunos de sus dioses: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno (también consideraban la Luna como planeta, y a veces, el Sol). Veamos ahora los planetas que se han descubierto con la ayuda del telescopio.

El primer planeta descubierto en la época moderna fue Urano, en 1781, gracias al telescopio que construyó William Herschel y a su tenacidad en la observación del cielo con la ayuda de su hermana Caroline.

Aunque Urano se puede ver a simple vista como los cinco planetas clásicos, nunca fue reconocido como tal y fue confundido con una estrella debido a su órbita lenta y a ser poco brillante.

William Herschel lo observó el 13 de marzo de 1781, desde el jardín de su casa, con un telescopio diseñado por él mismo. Al principio creyó que podía tratarse de un cometa. Diversos astrónomos dieron su opinión. Mientras Herschel seguía presentándolo como un cometa (si bien todavía no había visto ninguna cola), Johann Elert Bode concluyó que su órbita prácticamente circular era más propia de un planeta que de un cometa. En 1783, el mismo Herschel reconoció este hecho en la Royal Society, e inicialmente le dio el nombre de «Georgium Sidus» (la estrella de Jorge) en honor al rey Jorge III, que le concedió una renta anual de doscientas libras con la condición de que se trasladara a Windsor para que la familia real pudiese observar el nuevo planeta con sus telescopios.

Tras diversas propuestas, finalmente fue Johann Elert Bode quien optó por la versión latinizada del dios del cielo de la mitología griega, Urano, padre de Crono (cuyo equivalente romano daba nombre a Saturno). Ya que Saturno era el padre de Júpiter, lo más lógico era que el nuevo planeta tomara el nombre del padre de Saturno.

De hecho, Urano es el único planeta cuyo nombre es de origen griego (su homólogo romano es Caelus). Hacia 1827, Urano era el nombre más utilizado para el planeta, incluso en Gran Bretaña.

Herschel siguió construyendo telescopios más y más grandes y con ellos descubrió dos de los satélites de Urano: Titania y Oberón. Aunque procedía de una familia de intérpretes de oboe, en 1773 compró un libro sobre astronomía y un año después ya construía los mejores espejos del mundo, comprendiendo que el futuro de la observación estaba en los telescopios reflectores en lugar de los refractores.

Con el descubrimiento de Urano se ampliaban los límites del sistema solar, ya que por primera vez en la historia se había hallado un planeta usando telescopios.

Neptuno

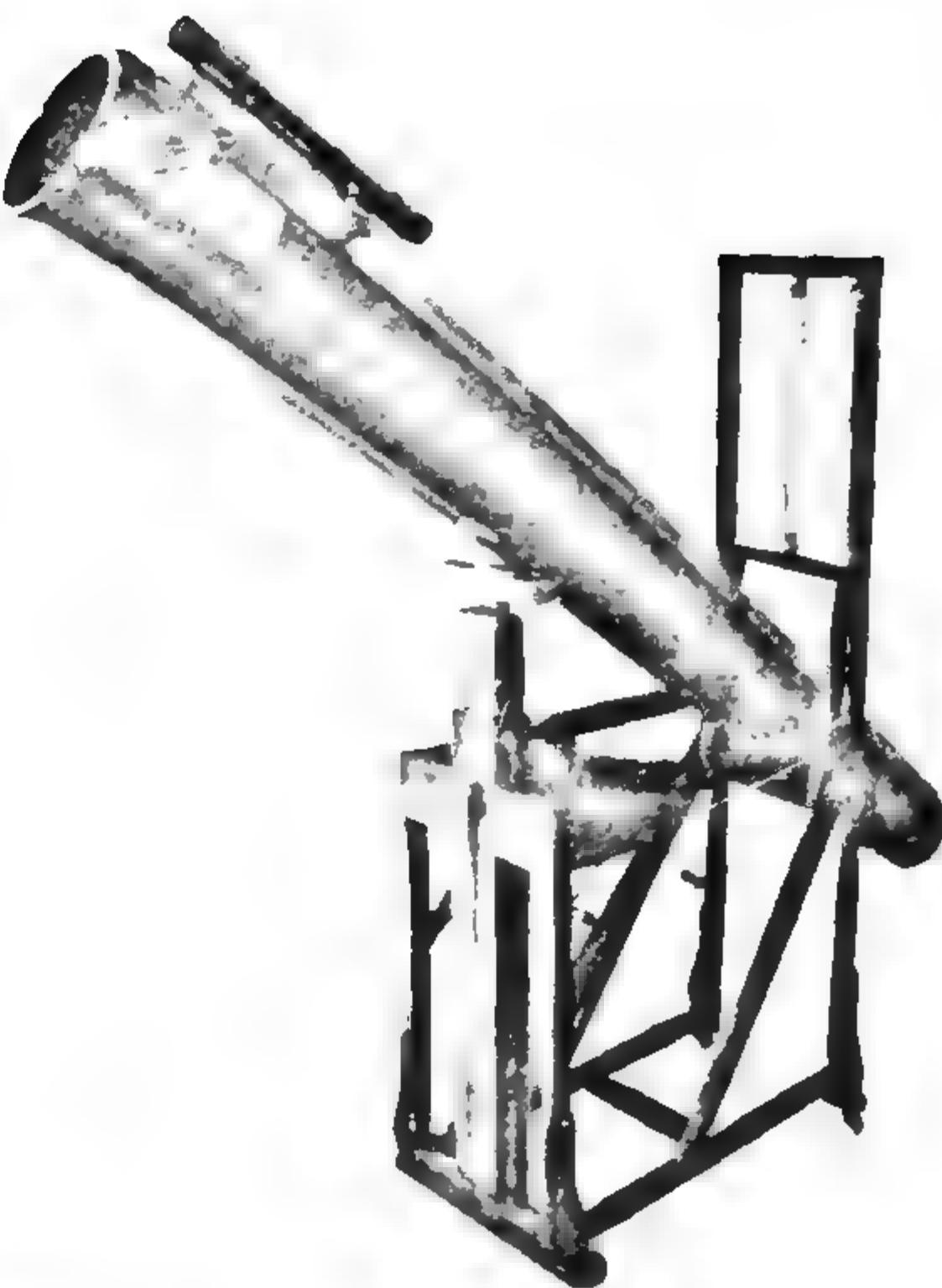
Se dice que Johann Gottfried Galle descubrió Neptuno en 1847, pero esta afirmación merece ser contada con más detalle. Di-

cho descubrimiento no fue accidental. En realidad la existencia de Neptuno fue deducida previamente por cálculos matemáticos, aplicando mecánica celeste. En efecto, la astronomía es una ciencia que predice fenómenos; por ejemplo, usando cálculos matemáticos se predicen los eclipses que van a acaecer en cualquier lugar de la Tierra y también la trayectoria de los planetas.

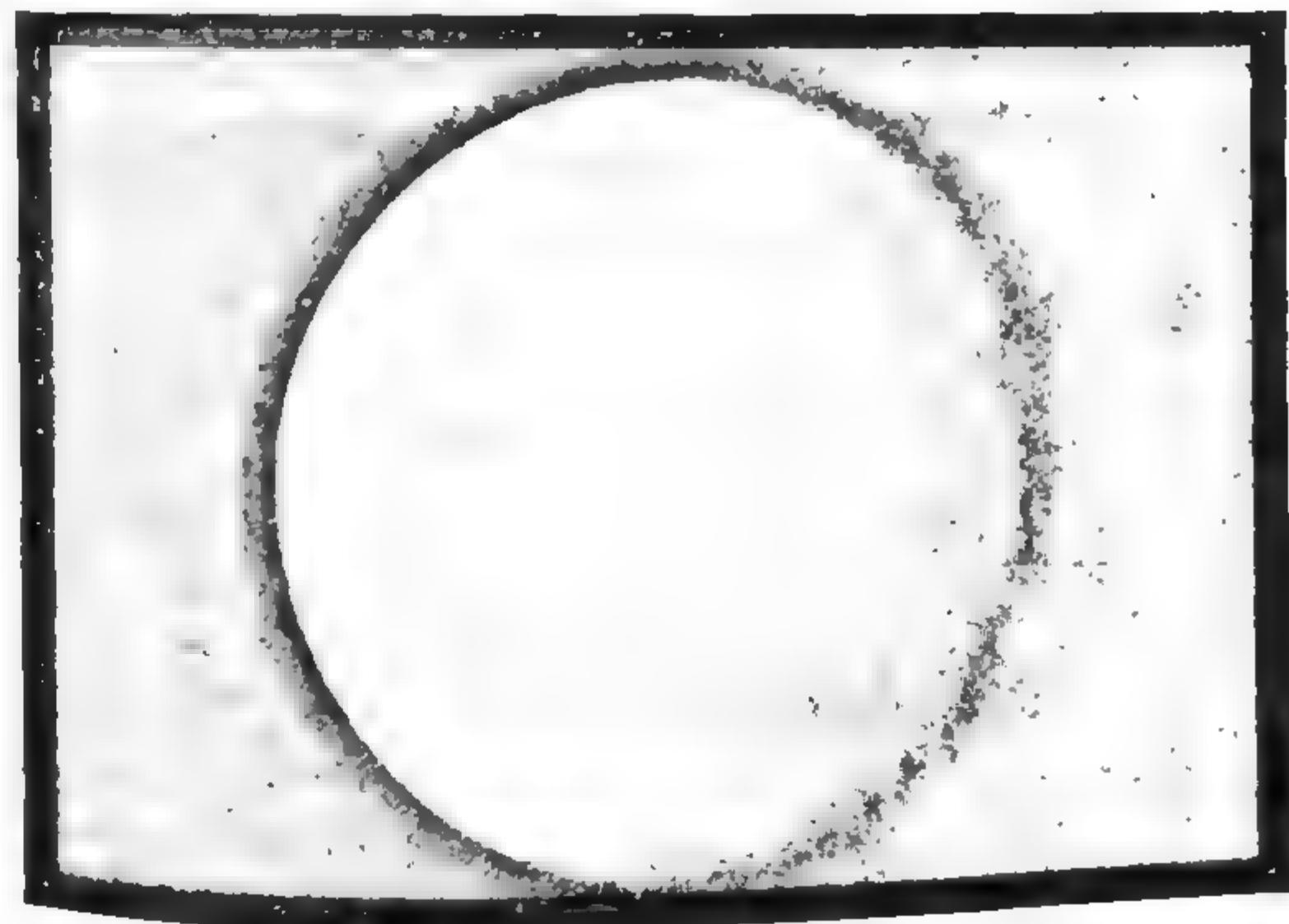
Se da la circunstancia de que John Couch Adams, a la sazón estudiante de veintiséis años de la Universidad de Cambridge, predijo la existencia de Neptuno usando cálculos de mecánica celeste, en septiembre de 1845. Adams, estudiando las anomalías en la órbita de Urano, dedujo que debía haber algún cuerpo cuya presencia perturbara su movimiento, y así pudo calcular la posición celeste en que debía estar el nuevo planeta. Inmediatamente intentó comunicar su resultado al Astrónomo Real (director del observatorio de Greenwich), George Biddell Airy (1801-1892). Por una serie de vicisitudes Adams no llegó a entrevistarse personalmente con Airy y tan solo pudo dejarle un escrito. El caso es que Airy consideró que la búsqueda del planeta desconocido no era un trabajo adecuado para el Real Observatorio de Greenwich y sugirió que se realizase en Cambridge. Pero allí se tomaron la tarea con calma.

Casi al mismo tiempo, Urbain Le Verrier (1811-1877), astrónomo profesional de reconocido prestigio, hizo los mismos cálculos (en junio de 1846) que Adams y se los envió a Galle, director del observatorio de Berlín, quien comprobó la existencia del planeta cerca de la posición predicha, el 23 de septiembre de 1846, el primer día que lo intentó. Sin duda, Le Verrier llegó a la misma predicción sin conocer los cálculos previos de Adams, pero el hecho de que este fuera un joven estudiante desconocido impidió, durante muchos años, que la comunidad internacional reconociera su mérito. Por el color azul verdoso del planeta, Galle lo bautizó con el nombre del dios del mar: Neptuno.

El descubrimiento de Urano debido a Herschel fue accidental, es decir, se realizó cuando este estaba realizando observaciones de estrellas sin ninguna intención de buscar un planeta. En cambio, el de Neptuno fue un descubrimiento siguiendo las



Arriba, réplica del telescopio que Herschel utilizó para descubrir Urano. Abajo, el planeta Neptuno.



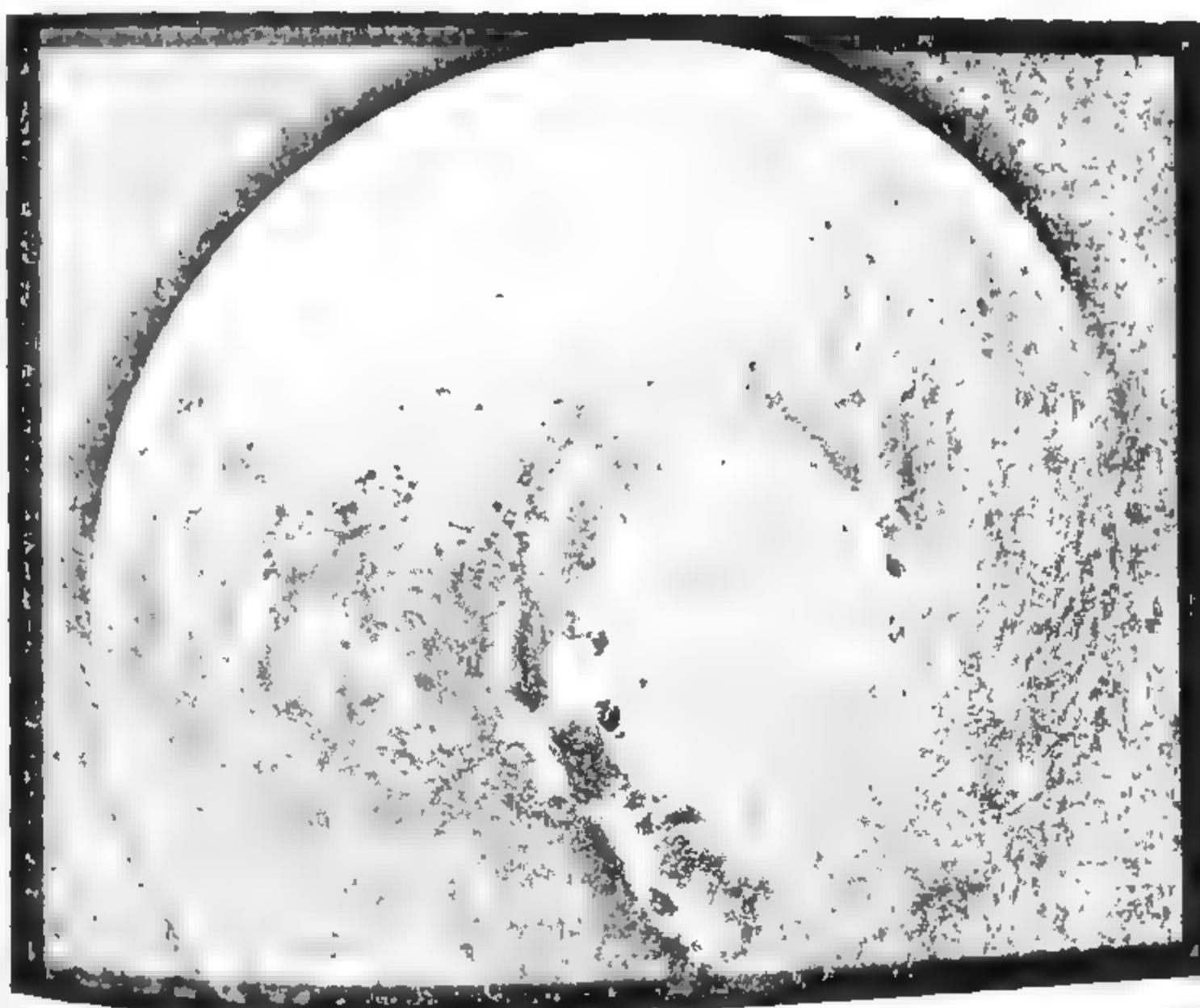
predicciones de unos cálculos matemáticos: fue un planeta descubierto «con un lápiz».

Los detectives del cielo

En 1766, Johann Daniel Titius formuló una ley que permitía relacionar la distancia de un planeta al Sol con el número de orden del mismo. En 1772, el director del Observatorio de Berlín, Johann Elert Bode, se atribuyó su hallazgo; de ahí el nombre: *ley de Titius-Bode*, aunque se cree que hay varios precedentes en el siglo xvii menos elaborados. La ley de Titius-Bode, publicada en 1778, sigue sin una explicación teórica sólida y convincente de su significado físico, es más bien una regla nemotécnica que otra cosa, pero en un momento determinado se pensó que llevaría a descubrir nuevos planetas.

Tres años después de haberse publicado la ley de Titius-Bode, Herschel descubrió Urano, que estaba situado a 19,18 unidades astronómicas (UA), lo que parecía confirmar esa ley. Una unidad astronómica es la distancia media entre el Sol y la Tierra. Según dicha ley, supuestamente había un quinto planeta entre Marte y Júpiter, así que la comunidad astronómica se interesó en localizarlo.

En un congreso astronómico que tuvo lugar en 1796 en Alemania, Joseph Lalande, astrónomo francés de gran prestigio, recomendó con énfasis su búsqueda. En 1800, Franz Xaver von Zach organizó un grupo de veinticuatro astrónomos «policías celestes» que se dividieron entre ellos la zona del zodíaco para explorar de forma exhaustiva y localizar ese quinto planeta. Lo cierto es que este grupo de policías no tuvo mucha suerte, ya que el monje Giuseppe Piazzi, que no era un miembro del grupo de búsqueda, fue más rápido que ellos y descubrió Ceres en enero de 1801, creyendo que era un cometa. El gran matemático Carl Friedrich Gauss, con los pocos datos de observación de que se disponía (Ceres estaba cerca del Sol y se perdió de vista), pudo calcular su órbita resultando ser efectivamente un cuerpo situado entre Marte y Júpiter, es decir, el que faltaba según la ley de Titius-Bode. Gauss desarrolló un nuevo método matemático



Arriba, Ceres, el objeto astronómico más grande del cinturón de asteroides. Abajo, Plutón, planeta enano del sistema solar.

para poder calcular una órbita elíptica con solo tres observaciones y predijo la posición de Ceres para el fin de año de 1801. Zach consiguió observarlo de nuevo exactamente en la posición predicha. Ceres estaba a 2,77 UA, y esto concordaba con la ley mencionada. El método de Gauss para cálculo de órbitas se sigue usando actualmente.

Esta ley de Titius-Bode, aun siendo una curiosidad matemática, tuvo gran importancia en el desarrollo de la astronomía a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Los descubrimientos de Urano y Ceres contribuyeron a darle gran difusión, pero después,

con los de Neptuno y Plutón, fue menos reconocida, ya que no la cumplen. No obstante, se aplica a los satélites (con más o menos éxito) y ahora incluso a los planetas extrasolares.

Cuando un filósofo dice algo que es verdad, entonces es trivial.

Cuando dice algo que no es trivial, entonces es falso.

CARL FRIEDRICH GAUSS

Durante más de medio siglo después de su descubrimiento, Ceres fue considerado el quinto planeta del sistema solar, pero tras localizarlo, la gran sorpresa de la policía celestial (que no se disolvió hasta 1815) fue que había otros planetas similares: Palas, Vesta y Juno.

Cuando William Herschel utilizó sus grandes telescopios observó que todos ellos parecían planetas diminutos. Por ello argumentó que no podían ser auténticos planetas y les llamó asteroides. Pero durante muchos años, debido a las limitaciones técnicas de los telescopios existentes, no se localizaron otros nuevos y se continuó considerando a Ceres un auténtico planeta, hasta la década de 1850.

A finales del siglo XIX la introducción de la fotografía astronómica generó el descubrimiento de 300 pequeños cuerpos. En la actualidad se conocen 600 000 asteroides, los mayores entre varios millones de rocas que forman el llamado *cinturón de asteroides*. El más grande de ellos es Ceres (con un tercio de la masa total del citado cinturón). A pesar de todo, dicha masa total equivale a solo un 4% de la masa de la Luna, y se trata por tanto de fragmentos de roca que no pudieron llegar a formar un planeta por falta de masa en el momento de la constitución del

sistema solar. De modo que finalmente Ceres fue degradado de planeta a asteroide.

Plutón, otro planeta degradado

Tras el descubrimiento de Neptuno, el banquero estadounidense y astrónomo aficionado Percival Lowell (1855-1916) construyó un magnífico observatorio en Arizona que ya utilizaba técnicas fotográficas para iniciar la búsqueda de un nuevo planeta aún más lejano. Según sus cálculos, debía existir uno responsable de las discrepancias que se daban en las órbitas de Urano y Neptuno. Actualmente se sabe que esos cálculos eran erróneos (si la masa de Neptuno se hubiera conocido mejor, no habría sido necesario otro planeta más), pero sirvieron para iniciar una gran búsqueda.

Cuando Clyde William Tombaugh (1906-1997) descubrió el 18 de febrero de 1930 el objeto que después se bautizó como Plutón (el dios romano del inframundo), inmediatamente se le asignó la categoría de planeta. En todo caso, la masa y la órbita de Plutón nunca podrían haber justificado las anomalías que Lowell pretendía solucionar porque se trata de un objeto mucho menor que los ocho planetas clásicos. El procedimiento empleado por Tombaugh consistió en tomar pares de fotografías de la misma zona del cielo, para examinar cada uno y determinar si algún objeto había cambiado de posición. Usaba un aparato que creaba una ilusión de movimiento al desplazar rápidamente dos fotografías sobre sí mismas, y permitía así detectar cambios en la ubicación de los objetos. El 18 de febrero de 1930 se percató de que había uno que se había movido en las placas tomadas el 23 y 29 de enero de ese año. En una fotografía de menor calidad tomada el 21 enero confirmó su movimiento.

Lowell murió en 1916, antes del descubrimiento de Plutón. Sin embargo, y sin saberlo, lo había fotografiado en dos ocasiones en sendas placas fotográficas del 19 de marzo y del 7 de abril de 1915, donde aparecía como un objeto débil.

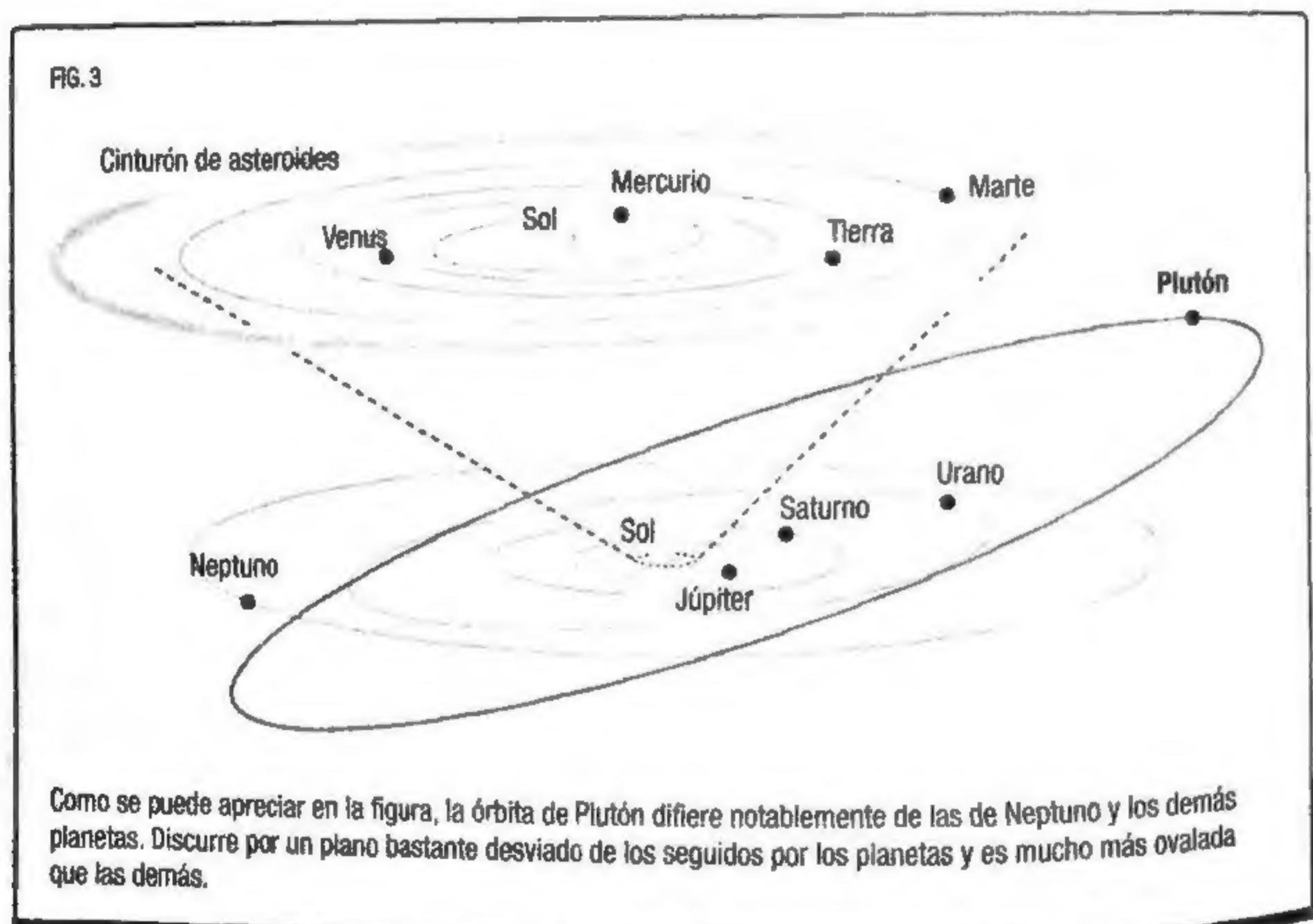
En realidad, Plutón siempre fue considerado un planeta un tanto raro. Entre sus rarezas estaban su pequeño tamaño,

la gran inclinación de su órbita (17 grados) respecto al plano de la eclíptica, del cual poco se separan las demás órbitas planetarias (figura 3); y su gran excentricidad (0,244), cuando las restantes órbitas son casi circulares. El descubrimiento en 1978 de Caronte, el gran satélite de Plutón, permitió medir la masa de este directamente. Resultó ser aproximadamente un 0,2% de la masa de la Tierra.

Caronte convierte a Plutón en un «planeta doble», ya que ambos son muy parecidos y giran respecto al centro de masas exterior a ambos. Todo ello lo hacía presentarse como un planeta fuera de lo normal.

Ahora se sabe que Plutón es realmente el prototipo de una nueva categoría de objetos que llamamos *transneptunianos*. Son cuerpos cuya órbita está, parcial o totalmente, más lejos del Sol que la de Neptuno. Las órbitas de los objetos transneptunianos también se caracterizan por ser excéntricas y altamente inclinadas con respecto a la eclíptica.

FIG. 3



A finales del siglo XX se descubrieron numerosos cuerpos en la misma región del sistema solar donde se halla Plutón, lo que coloca a este como parte de la población de objetos del llamado *cinturón de Kuiper* o transneptunianos.

En 2002 se descubrió Quaoar, un objeto transneptuniano cuyo diámetro se aproxima a la mitad del de Plutón. En 2004, a una distancia de 100 UA, se encontró Sedna, con un diámetro algo menor que el anterior. En 2005, se anunció el descubrimiento de un nuevo objeto transneptuniano, Eris, con mayor masa que Plutón y el más masivo descubierto en el sistema solar desde que lo fuera Tritón en 1846. Sus descubridores lo llamaron el décimo planeta, aunque otros astrónomos lo consideraron un argumento firme para reclasificar a Plutón como un planeta menor.

Se cree que la población transneptuniana es fuente de muchos cometas de periodo corto. Plutón está en el cinturón de Kuiper, una región estable a entre 30 y 50 UA del Sol, y comparte características cometarias con otros objetos de dicho cinturón. Por ejemplo, el viento solar está desgastando poco a poco su superficie y enviándola al espacio.

Por todo lo anteriormente expuesto, en la 26.º Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional, celebrada en la ciudad de Praga del 14 al 25 de agosto de 2006 con el objeto de concretar y aclarar el concepto de planeta, se estableció para este la definición que exponemos a continuación. Para que un cuerpo sea un planeta debe cumplir tres condiciones. La primera es que ha de estar en órbita alrededor del Sol. La segunda es que tiene que ser lo bastante masivo como para que su propia gravedad lo haya redondeado. Y la tercera es que debe haber retirado de la vecindad de su órbita a otros objetos comparables.

Como consecuencia de esta exigencia de las tres condiciones, los planetas del sistema solar solo pueden ser: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

La Unión Astronómica Internacional decidió además que los cuerpos que cumpliesen solo los dos primeros criterios pasarían a denominarse *planetas enanos*. Así pues, Plutón fue degradado después de ser considerado planeta durante 76 años. Entre ellos también se cuentan Eris, Makemake, Haumea y Ceres. Sin

duda, su número irá aumentando. De hecho existe una lista de candidatos a planetas enanos que se está estudiando. Por ejemplo, Caronte es uno de los miembros de dicha lista, ya que la definición no deja claro cómo distinguir entre satélite o sistema binario. Por ello se le sigue considerando un satélite del planeta enano Plutón.

Desde las primitivas observaciones a ojo desnudo hasta la introducción del telescopio y el descubrimiento de la verdadera realidad de lo que nos rodea, mucho ha cambiado nuestra concepción del sistema solar y de nuestro propio planeta. Mirar al espacio y las estrellas, seguir los movimientos del Sol y los planetas, nos ha proporcionado además herramientas fundamentales para medir el tiempo y consolidarnos como civilización. Hemos pasado de la curiosidad al aprovechamiento de la realidad astronómica, y de este al conocimiento, que nos hace más sabios. Todo ello ha sido posible gracias a grandes científicos que han ayudado a borrar la ignorancia y traer la luz. El camino, sin embargo, sigue abierto.

BAYARD, J.P., *El secreto de las catedrales*, Madrid, Tikal Ediciones, 1995.

BELMONTE, J.A., *Pirámides, templos y estrellas: astronomía y arqueología en el Egipto antiguo*, Barcelona, Crítica, 2012.

BROMAN, L., STALELLA, R. y ROS, R.M., *Experimentos de astronomía*, Madrid, Pearson Alhambra, 1988.

GALILEI, G. y KEPLER, J., *La gaceta sideral y Conversación con el mensajero sideral*, Madrid, Alianza, 2007.

GALLO, J. y ANFOSSI, A., *Cosmografía*, Ciudad de México, Progreso, 1973.

HANI, J., *El simbolismo del templo cristiano*, Palma de Mallorca, José J. de Olañeta, 2016.

LANDES, D.S., *Revolución en el tiempo*, Barcelona, Crítica, 2010.

ROS, R.M. y GARCÍA, B. (EDS.), *14 pasos hacia el universo*, Barcelona, Antares, 2012.

SOBEL, D., *Longitud*, Madrid, Debate, 1997

aberración
cromática 139, 141
por coma 141

Adams, John Couch 144

Albategnius 24, 25

Alejandro Magno 81, 90, 102

Alfonso X el Sabio 25, 111

Al Sufi 24

año
bisiesto 9, 102, 107, 108, 110-112, 114, 115
intercalar 105
sidéreo 17, 101, 118
trópico 17, 101, 102, 108, 111, 118

Aristarco de Samos 11, 42, 44, 45, 81, 88, 90

Aristóteles 9, 11, 25, 42, 45-48, 55, 60, 126, 127, 135

Armonía de las Esferas 41

Arquímedes 44

astrolabio 10, 25, 26

azafea 25

Azarquiel 24, 25

banda de totalidad 84

Bode, Johann Elert 143, 146

Brahe, Tycho 21, 34, 54-56

Bruno, Giordano 11, 57, 59, 60

calendario 9, 16, 67, 70, 74, 80, 88, 101-108, 112, 114, 115, 117
gregoriano 10, 102, 108, 110-114, 116
juliano 10, 107, 108, 110, 111, 116

Canopo 67, 73

catálogos estelares 10, 13, 16, 17, 21, 34, 36, 80

cenit 24, 64, 65, 74, 75, 80

César, Julio 10, 67, 88, 103, 107

ciclo de saros 80, 81, 88

cinturón de asteroides 148, 150

cinturón de Kuiper 151

clepsidra 107
Colón, Cristóbal 10, 30, 31, 34, 91, 93, 94
constelación 8, 21, 27, 31, 35, 43, 45, 71, 79, 80, 118, 123
Copérnico, Nicolás 11, 25, 39, 45-49, 52-55, 88, 90, 103, 127, 135, 136, 142
cosmología 41, 60
deferente 9, 42, 47

eclipse
anular 24, 81, 84, 89
de Luna 45, 54, 77, 80-84, 88, 90, 91, 94
de Sol 9, 77, 81-86, 88, 89, 91, 92
híbrido 84
parcial 81, 83, 84
penumbral 81
total 81, 84, 86, 89, 91
eclíptica 24, 47, 64, 82, 101, 117, 124, 150
Eddington, Arthur 92
Einstein, Albert 92, 93, 142
epagómenos 102, 103
epíciclo 9, 42, 46, 47, 52, 53, 133
equinoccios 17, 53, 64, 69, 74, 75
precesión de los 17, 117, 118
Eratóstenes 10, 30, 45, 50, 51
estrella variable 23
evolución estelar 21, 34
exoplaneta 36, 57

Gaia 36, 37
Galilei, Galileo 11, 39, 48, 54, 58, 90, 95, 116, 127-137, 139, 140
Galle, Johann Gottfried 143, 144
Gauss, Carl Friedrich 146, 148
geocentrismo 8, 9, 11, 45, 60, 135

GPS (Sistema de Posicionamiento Global) 98
Gregorio XIII 10, 103, 108, 111, 114, 115

Halley, Edmund 32, 79, 95
Harrison, John 96, 97
heliocentrismo 11, 52, 53, 135
Heráclides 42
Herschel, William 142-146, 148
Hiparco de Nicea 10, 16-18, 20, 21, 26, 34, 81, 118
Hipparcos 34, 36
Huygens, Christiaan 90, 96, 132, 140

Júpiter 42, 46, 47, 90, 95, 109, 110, 124, 125, 127, 130, 135, 142, 143, 146, 150, 151

Kepler, Johannes 11, 21, 39, 49, 53-56, 116, 125, 134, 137, 138
Kepler
leyes de 56
observatorio espacial 57, 58

latitud 10, 15-17, 25-32, 34, 45, 65, 74, 86, 90, 93
lente gravitatoria 92, 93
ley de la gravitación universal 137, 138
ley de Titius-Bode 146, 148
línea de los nodos 82
longitud 10, 17, 32, 45, 90, 93-98
Lowell, Percival 149
Lucrécio 48
Luna 8, 12, 13, 15, 18, 42, 44-47, 52, 54, 56, 57, 73, 77, 79-85, 88, 91, 94, 95, 107, 109, 112, 123, 124, 126-129, 135, 136, 138, 142, 148

Magallanes, Fernando de 10, 32, 33
magnitud 10, 16-21, 23, 24, 36
absoluta 20, 21, 36
aparente 18, 20-22
mareas 45, 56, 136, 138
Marte 9, 42, 43, 46, 47, 56, 103, 109, 110, 127, 142, 146, 150, 151
materia oscura 36
Mercurio 42, 46, 47, 105, 109, 126, 130, 135, 142, 150, 151
mes lunar sinódico 107
Música de las Esferas 54

Neptuno 143-145, 148-151
Newton, Isaac 48, 56, 116, 137-140, 142
leyes de 88, 138, 139
nova 9, 21, 22, 128

orto 16, 73, 80

paralaje 44, 52
penumbra 83, 129
planisferio celeste 26, 27, 118
Plutón 106, 147-152
Pogson, Norman R. 18, 19
Ptolomeo 9, 11, 17, 23, 24, 42, 45-48, 52, 54, 55, 60, 80, 81, 118, 126, 127, 136
punto Aries 101, 118

salida heliaca 102, 104
Saturno 42, 46, 47, 109, 110, 127, 130-132, 135, 142, 143, 150, 151

Scheiner, Christoph 132, 134
Seleuco de Seleucia 45
sextante 26, 97, 98
sistema sexagesimal 81, 82
Sirio 15, 16, 18, 19, 67, 102, 104, 44-47, 50, 52-54, 56, 57, 61, 64-66, 69-75, 77, 80-86, 88-92, 95, 98, 101, 109, 110, 116, 118, 123, 124, 126, 129, 130, 132-135, 138, 139, 142, 146, 150-152
supernova 9, 21, 22, 55

Tales de Mileto 41, 91
telescopio 7, 10-12, 44, 127-130, 132-134, 142, 143, 145, 148, 152
reflector 139-141, 143
refractor 139-141
teodolito 17
terminador 129
Titius, Johann Daniel 146
Tombaugh, Clyde William 149
tránsito 56, 57
transneptuniano 150, 151

umbra 83
Urano 142-146, 148-151

Venus 12, 18, 42, 46, 47, 56, 80, 105, 109, 123-125, 127, 130, 132, 133, 136, 142, 150, 151
Vía Láctea 36, 55, 129
Vitruvio, Marco 67-69

zodiaco 17, 104, 118, 119, 123, 146